



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO



Superfícies Seletivas em Frequência Complementares (CFSS) – Conceito e Projeto

Bruno Sátiro da Silva

Orientador: Prof. Dr. Antônio Luiz Pereira de Siqueira Campos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Engenharia Elétrica, Telecomunicações) como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Número de Ordem do
PPgEEC: M518

NATAL – RN
Janeiro de 2018

*Letícia Gabriela está presente neste
trabalho.*

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

Sistema de Bibliotecas - SISBI

Catálogo de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Bruno Sátiro da.

Superfícies Seletivas em Frequência Complementares (CFSS):
conceito e projeto / Bruno Sátiro da Silva. - 2018.
56f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do
Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em
Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2018.

Orientador: Dr. Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos.

1. Superfícies seletivas em frequência - Dissertação. 2. FSS -
Dissertação. 3. Superfícies seletivas em frequência
complementares - Dissertação. 4. CFSS - Dissertação. I. Campos,
Antonio Luiz Pereira de Siqueira. II. Título.



Aos vinte e quatro dias do mês de janeiro do ano de dois mil e dezoito, foi realizada a 518ª sessão de defesa de dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN, na qual o mestrando Bruno Sátiro da Silva apresentou o trabalho que tem como título: Superfícies Seletivas em Frequência Complementares (CFSS) Conceito e Projeto. A sessão teve início às 09h00min, tendo a banca examinadora sido constituída pelos seguintes participantes: Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos (Dr. UFRN, Orientador), Márcio Eduardo da Costa Rodrigues (Dr. UFRN, Examinador Externo ao Programa) e Alfredo Gomes Neto (Dr. IFPB, Examinador Externo à Instituição). Após a apresentação do trabalho e o exame pela banca, o mestrando foi considerado APROVADO, tendo sido lavrada a presente ata, que vai assinada pelos examinadores e pelo mestrando. A versão final da dissertação deverá ser entregue ao programa, no prazo máximo de 60 dias, contendo as modificações sugeridas pela banca examinadora e constante na folha de correção anexa. Conforme o Artigo 49 da Resolução 197/2013 - CONSEPE, o candidato não terá o título se não cumprir as exigências acima.

Dr. ALFREDO GOMES NETO, IFPB

Examinador Externo à Instituição

Dr. MARCIO EDUARDO DA COSTA RODRIGUES, UFRN

Examinador Externo ao Programa

Dr. ANTONIO LUIZ PEREIRA DE SIQUEIRA CAMPOS, UFRN

Presidente

BRUNO SÁTIRO DA SILVA

Mestrando

Agradecimentos

Ao Sr. Severino Sátiro da Silva e à Sra. Sandra Dantas da Silva, meus pais, por, desde muito cedo, me ensinarem sobre a importância dos estudos.

À minha irmã Patrícia, pelo apoio e amor incondicional e exato.

Aos demais familiares próximos, com especial atenção à minha vó Dalva.

À Letícia Gabriela, por toda sua torcida e por dividir comigo sua vida. Eu acredito na ciência, consequentemente, na evolução do seu tratamento e na melhoria da sua qualidade de vida.

Aos meus amigos, parte fundamental da vida de qualquer jovem comum do século XXI.

A todos os professores que já tive, em todos os níveis acadêmicos.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em todas suas instâncias, que é parte integrante da pessoa que sou. Obrigado por todo conhecimento e educação.

Ao CNPq, pelo suporte financeiro, que me permitiu concluir com tranquilidade esta pesquisa.

À Coordenação e à Secretaria do Ppgeec. Parabéns pela gestão.

Ao meu orientador, Professor Antonio Luiz Pereira de Siqueira Campos, pelo apoio, entendimento e pela grande e eficiente transmissão de conhecimento e experiência.

Aos professores Marcio Eduardo da Costa Rodrigues e Alfredo Gomes Neto, por todas as orientações recebidas neste trabalho.

E, por fim, á aleatoriedade do Universo, que me fez nascer em um pequeno planeta chamado Terra, membro de uma espécie que tem como uma de suas principais características a produção e disseminação (ou propagação, que é uma palavra eletromagneticamente mais bonita) de conhecimento.

Muito obrigado.

Resumo

As comunicações sem fio são parte integrante do mundo moderno, possuindo papel fundamental no processo de globalização e desenvolvimento social e tecnológico. Assim, diversas pesquisas são realizadas para se obter uma constante otimização desse tipo de comunicação, sendo o estudo em superfícies seletivas em frequência (FSS, *Frequency Selective Surfaces*) uma área bastante abordada há mais de quatro décadas, devido ao seu largo espectro de aplicações na área de telecomunicações. Com a evolução da tecnologia, novas exigências surgem a cada dia, com respostas mais específicas para cada aplicação. Nesse contexto, o presente trabalho aborda um tipo específico de FSS, com características muito interessantes para sistemas modernos de comunicação, as superfícies seletivas em frequência complementares (CFSS, *Complementary Frequency Selective Surfaces*). Devido às suas características relevantes, como comportamento multi-banda, alta seletividade nas faixas de passagem, nulos estreitos e grande estabilidade angular, as CFSS podem ser utilizadas em uma gama de aplicações, como em aeronaves, radomes e satélites. Como parte desse trabalho, foram propostas e analisadas novas geometrias para CFSS. Simulações, envolvendo um detalhado estudo paramétrico das estruturas propostas foram realizadas, para um melhor entendimento do comportamento da resposta em frequência das estruturas, com relação às suas dimensões físicas. Dois protótipos foram construídos e medições foram efetuadas com o intuito de validar a análise realizada. Uma boa concordância entre resultados simulados e medidos foi observada.

Palavras-chave: Superfícies Seletivas em Frequência, FSS, Superfícies Seletivas em Frequência Complementares, CFSS.

Abstract

Wireless communications are an integral part of modern society, with fundamental role in the process of globalization and technological progress. Therefore, several researches are carried out in order to achieve constant optimization in this area. Frequency Selective Surfaces (FSS) have been approached for decades because of its telecommunications functionalities. Due to evolution of technology, new demands arise every day, each one with specific responses for each application, thus, the FSS need to be modeled to meet the most diverse requirements. In this context, the present work aims to show a specific model of FSS. The Complementary Frequency Selective Surfaces (CFSS) have very interesting characteristics for modern communication systems, such as multi-band frequency behavior, high selectivity in transmission bands, narrow null bands and great angular stability, being useful in a wide range of applications, such as aircrafts, radomes and satellite communication. As part of this work, new unit-cell geometries for CFSS were proposed and analyzed. Computational simulations, with a detailed parametric study of the proposed structures, were performed for a better understanding of the frequency response.

Keywords: Frequency Selective Surfaces, FSS, Complementary Frequency Selective Surfaces, CFSS.

Sumário

Lista de Figuras	VII
Lista de Tabelas	IX
Lista de Símbolos e Abreviaturas.....	X
Capítulo 1 - Introdução.....	11
Capítulo 2 - Superfícies Seletivas em Frequência - FSS.....	14
2.1 Contextualização e Definições	14
2.2 O início da filtragem em frequência.....	15
2.3 Parâmetros de Projeto.....	16
Capítulo 3 - Superfícies Seletivas em Frequência Complementares - CFSS.....	20
3.1 Conceitos Iniciais	20
3.2 Aplicações.....	22
3.4 Estado da Arte em CFSS	24
Capítulo 4 – Proposta de uma Nova CFSS com Geometria Simplificada.....	29
4.1 Geometria Proposta.....	29
4.2 Aplicações das CFSS propostas.....	30
4.3 Simulações computacionais e discussão dos resultados para a aplicação como sub-refletor.....	31
4.4 Modificação da geometria inicial e nova aplicação.....	37
Capítulo 5 – Construção de protótipos, medição e discussão de resultados.....	44
5.1 CFSS para comunicação via satélite.....	44
5.2 CFSS para uso em blindagem eletromagnética em sistemas 4G LTE.....	48
Capítulo 6 - Conclusões	51
Referências Bibliográficas	53

Lista de Figuras

Figura 2.1	O espectro eletromagnético e algumas de suas divisões	14
Figura 2.2	Funcionamento da grade de difração.....	16
Figura 2.3	Tipos de elementos e características em frequência.....	17
Figura 2.4	N-polos conectados pelo centro.....	17
Figura 2.5	Espiras simples e duplas.....	18
Figura 2.6	Elementos sólidos.....	18
Figura 2.7	Formas geométricas mistas.....	18
Figura 3.1	(a) Espira quadrada e dipolo cruzado e suas respectivas partes complementares (b) CFSS.....	21
Figura 3.2	Máximo acoplamento entre elementos.....	22
Figura 3.3	FSS utilizada como radome	23
Figura 3.4	Antena Cassegrain com CFSS como sub-refletor.....	23
Figura 3.5	Estrutura inicialmente analisada em [8].....	24
Figura 3.6	(a) CFSS proposta (b) Respostas simuladas e medidas.....	25
Figura 3.7	Geometrias propostas através de cascadeamento em [12].....	26
Figura 3.8	Célula unitária proposta em [13] para aplicação WLAN.....	27
Figura 3.9	CFSS estudada em [21].....	28
Figura 4.1	(a) Célula unitária <i>patch</i> e <i>slot</i> complementar (b) Célula unitária em ambiente de simulação.....	30
Figura 4.2	Efeito em frequência das geometrias constituintes da CFSS.....	32
Figura 4.3	Comparação das respostas de transmissão para diferentes espessuras de substrato FR-4.....	34
Figura 4.4	Variação da espessura da espira quadrada externa.....	34
Figura 4.5	Variação da espessura da espira quadrada interna.....	35
Figura 4.6	Respostas para polarização horizontal (a) e vertical (b) com diferentes ângulos de incidência.....	36
Figura 4.7	Geometrias das células unitárias da CFSS (<i>patch</i> /abertura) proposta modificada.....	38
Figura 4.8	Variação da espessura do substrato dielétrico FR-4 para segunda CFSS.....	39
Figura 4.9	Variação da espira externa da célula unitária da segunda CFSS.....	40

Figura4.10	Variação da resposta em frequência devido à mudança da espessura da espira interna.....	40
Figura4.11	Compação da transmissão através da FSS com elementos do tipo <i>patch</i>	41
Figura4.12	Compação da transmissão através da FSS com elementos do tipo abertura.....	42
Figura4.13	Comparação da transmissão através da CFSS completa e suas partes constituintes.....	43
Figura 5.1	<i>Setup</i> de medição.....	44
Figura 5.2	CFSS para comunicações via satélite construída posicionada para a medição..	45
Figura 5.3	Comparativo entre resultados simulados e medidos nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical.....	46
Figura 5.4	Medição da variação angular da CFSS medida nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical.....	47
Figura 5.5	Faces da CFSS construída para blindagem eletromagnética.....	48
Figura 5.6	Comparativo entre resultados simulados e medidos nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical para a segunda CFSS.....	49
Figura 5.7	Medição da variação angular da CFSS medida nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical.....	50

Lista de Tabelas

Tabela 4.1	Valores iniciais da célula proposta.....	30
------------	--	----

Lista de símbolos e abreviaturas

ϵ_0	Permissividade elétrica no espaço livre
ϵ_r	Permissividade elétrica relativa
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
$\tan \delta$	Tangente de perdas
v_0	Velocidade da onda eletromagnética no vácuo
λ	Comprimento de onda
CFSS	<i>Complementary frequency selective surface</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
FSS	<i>Frequency Selective Surface</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
RCS	<i>Radar cross section</i>
RF	Radiofrequência
SHF	<i>Super High Frequency</i>
UWB	<i>Ultra Wideband</i>

Capítulo 1

Introdução

Os sistemas de telecomunicações avançaram significativamente nas últimas décadas, fruto de uma maior necessidade de troca rápida e eficaz de informação e da constante evolução tecnológica. As pesquisas científicas na área das comunicações sem fio têm recebido destaque devido à sua grande abrangência na sociedade. Redes sem fio, redes móveis celulares, satélites e muitos outros sistemas de comunicação que utilizam a propagação de ondas eletromagnéticas, em meio não confinado, se tornaram importantes, na sociedade moderna. Nesse contexto, estruturas capazes de transmitir e/ou bloquear ondas eletromagnéticas em frequências de interesse têm sido muito estudadas por inúmeros pesquisadores em todo o mundo.

Superfícies seletivas em frequência (*Frequency Selective Surfaces* – FSS) estão presentes nos mais diversos sistemas de comunicação, funcionando como filtros espaciais, possibilitando o controle do fluxo de sinais de acordo com a necessidade [1]. Devido à busca constante por um melhor aproveitamento do espectro eletromagnético, os sistemas de telecomunicações se tornam cada dia mais complexos, passando a exigir novos modelos de FSS que apresentem respostas em frequência específicas, como a operação em múltiplas bandas, alta seletividade em frequência e estabilidade angular. Entretanto, FSS tradicionais, geralmente, não apresentam essas características conjuntamente [2].

Assim, pesquisadores têm se empenhado em projetar FSS que atendam esses requisitos. Em [3], os autores propõem estruturas com comportamento em múltiplas faixas de frequência por meio de variações complexas de geometrias simples, como a espira quadrada, proporcionando três bandas de transmissão. Contudo, analisando-se os resultados apresentados, percebe-se uma instabilidade angular considerável na resposta em frequência. Com o mesmo objetivo, FSS com uso de elementos fractais são apresentadas em [4] e [5]. Nestes trabalhos, instabilidade angular e dependência de polarização são verificadas em [4], enquanto que em [5], a principal desvantagem é a complexidade da geometria proposta, dificultando a fabricação da estrutura. O método do cascadeamento é utilizado por Migbao *et al* em [6]. Nesse trabalho é proposta uma superfície seletiva em frequência com quatro bandas de funcionamento que apresenta boa estabilidade angular para ângulos incidentes de até 30° e

independência de polarização, devido à simetria da célula unitária. Porém, ao cascatear camadas, a FSS torna-se mais espessa e menos flexível, podendo ser um empecilho para aplicações, nas quais volume reduzido e flexibilidade sejam desejáveis. FSS tridimensionais também são encontradas na literatura [7] com o principal objetivo de promover estabilidade angular, porém devido à forma incomum de sua estrutura (geralmente em formato cúbico) sua aplicação se mostra extremamente limitada.

Nesse contexto, podem ser citadas as superfícies seletivas em frequência complementares (CFSS), que apresentam características desejadas, para diversas aplicações em sistemas de comunicação. A possibilidade de funcionamento em múltiplas bandas aumenta mais ainda a sua aplicabilidade, passando por satélites, radares, telefonia móvel e outras tecnologias que fazem uso de mais de uma banda de frequências. Outra característica importante é a grande estabilidade angular proporcionada por esse tipo de estrutura planar, sendo esse comportamento de extremo interesse principalmente em comunicações móveis, nas quais transmissor e receptor estão em constante movimento relativo. A estabilidade angular também torna-se importante em comunicações de ponto fixo, devido aos múltiplos percursos dos sinais, oriundos principalmente de reflexões e difrações ocorridas no ambiente de propagação. A alta seletividade da resposta em frequência (bandas de transmissão e de rejeição estreitas em comparação com FSS tradicionais) também tem um papel importante no que diz respeito à filtragem de sinais com largura de banda bem definida e à minimização de interferências.

Apesar de todas as características favoráveis descritas anteriormente, não há um acervo científico significativo sobre as superfícies seletivas em frequência complementares, tendo seu trabalho inicial de maior importância, onde foi definido o termo CFSS, sido publicado no ano de 2000. Lockyer *et al* em [8] descreveram o funcionamento básico desse tipo de FSS, fazendo uso de geometrias básicas como o dipolo simples e a espira circular, e analisaram parâmetros de controle da resposta em frequência.

Este trabalho tem como objetivo ser mais uma contribuição para o tema abordado, tendo em vista também o escasso material científico sobre o assunto em português, além de contribuir cientificamente por meio da proposição e construção de novos modelos de CFSS para duas aplicações de muito interesse em telecomunicações, como será mostrado nos próximos capítulos.

O trabalho se encontra organizado da seguinte forma:

- No **Capítulo 2** é apresentada a teoria fundamental sobre superfícies seletivas em frequência juntamente com suas principais características e aplicações;

- No **Capítulo 3** são apresentadas as superfícies seletivas em frequência complementares (CFSS), dando ênfase a suas principais características, métodos de controle da resposta e aplicações;
- No **Capítulo 4** é feita a proposta de duas novas CFSS, partindo de uma mesma geometria inicial, fazendo uso de simulações computacionais com análise dos resultados obtidos;
- O **Capítulo 5** traz os resultados de medições realizadas com os protótipos construídos e o comparativo com os resultados simulados;
- Finalmente, o **Capítulo 6** apresenta uma discussão conclusiva do trabalho.

Capítulo 2

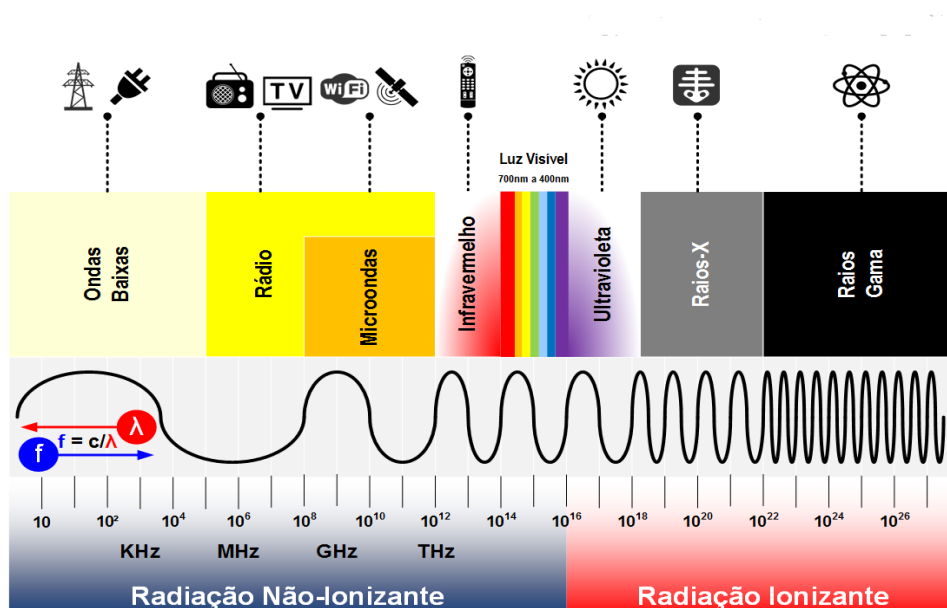
Superfícies Seletivas em Frequência - FSS

Este capítulo descreve a teoria básica a respeito das superfícies seletivas em frequência, apresentando sua configuração tradicional, características e tipos de elementos comumente utilizados como células unitárias.

2.1 – Contextualização e Definições

Com a constante crescente demanda por serviços de telecomunicações, como internet e telefonia móvel, o uso do espectro eletromagnético tem se tornado mais intenso com o passar dos anos, em que cada tecnologia atua sobre uma determinada faixa de frequências, exigindo respostas específicas. Na Figura 2.1 podem ser observadas algumas divisões do espectro de acordo com sua utilização.

Figura 2.1 – O espectro eletromagnético e algumas de suas divisões.



Fonte: Blog LabCisco, disponível em: <http://labcisco.blogspot.com.br/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html>.

As superfícies seletivas em frequência são estruturas, geralmente, bidimensionais com elementos metálicos do tipo *patch* ou elementos do tipo abertura, dispostos sobre uma superfície dielétrica, em forma de arranjo periódico. As FSS funcionam como filtros espaciais, controlando o fluxo de ondas eletromagnéticas em determinadas frequências [1, 2].

Ao contrário dos filtros elétricos, que trabalham com transmissão e atenuação do sinal, FSS possuem a vantagem de serem baseadas nos fenômenos de refração e reflexão, ou seja, o sinal da banda refletida não é necessariamente perdido, podendo ser redirecionado para outro fim.

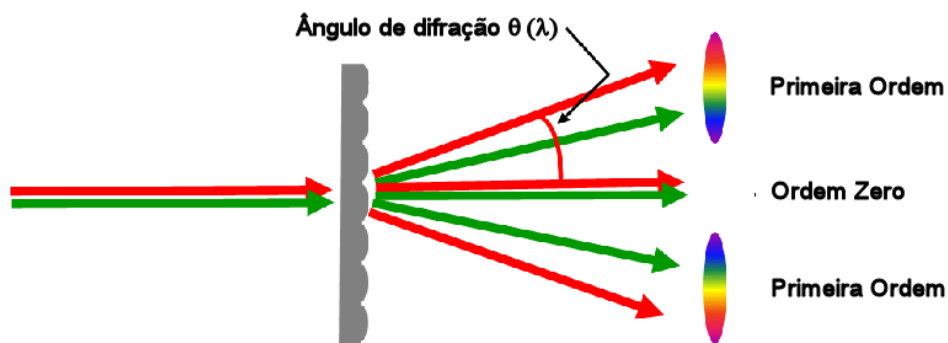
As FSS têm se destacado há mais de 40 anos devido à sua vasta utilização. Por servirem de filtros para ondas eletromagnéticas, podem funcionar como sub-refletores em antenas de alto ganho, polarizadores e radomes. Devido a essas características, as superfícies seletivas em frequência são importantes no atual patamar das telecomunicações [1].

2.2 – O início da filtragem em frequência

O fenômeno de filtragem de ondas eletromagnéticas tem suas bases em estudos realizados em meados do século XVIII. Em março de 1785, Francis Hopkinson, um escritor e compositor americano, escreveu ao cientista David Rittenhouse sobre um curioso fenômeno que observara enquanto estendia um lenço de seda contra a luz de um candeeiro de rua. Hopkinson percebeu que se formava um padrão de imagem composto por listras claras (luz) e de sombra (ausência de luz). Hopkinson ainda não sabia, mas ele havia observado a difração da luz.

Rittenhouse, curioso com a observação de seu amigo, construiu um aparato, que ficou conhecido como grade de difração óptica, constituído de fios condutores finos dispostos horizontalmente equidistantes. Ele estudou o fenômeno, observando que cada cor de luz desviava com um ângulo diferente das demais ao passar pela grade e que esse ângulo dependia do espaçamento entre os fios, conforme ilustrado na Figura 2.2. Foi a partir de então que a natureza ondulatória da luz ganhou mais atenção e o estudo da óptica avançou [9]. O fenômeno descrito por Rittenhouse, dependência da resposta em frequência com as dimensões físicas, é também fundamental para qualquer anteparo consistindo de elementos condutores ou aberturas espaçadas periodicamente [2], como uma FSS.

Figura 2.2 - Funcionamento da grade de difração.



Fonte: Site da UFRGS, disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/telesc/espectroscopia.html>.

2.3 - Parâmetros de projeto

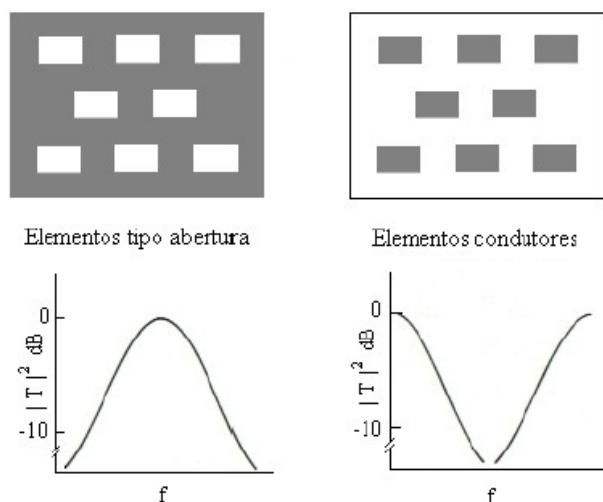
O projeto de uma FSS leva em conta diversos parâmetros, tais como: forma geométrica dos elementos, características eletromagnéticas e espessura do substrato, periodicidade do arranjo e tipo de elemento (elementos condutores/*patches* ou do tipo abertura/*slot*). Esses são os principais parâmetros a serem projetados, para se obter uma determinada resposta em frequência, de acordo com a aplicação.

A configuração de cada elemento e o espaçamento entre eles contribuem para o espalhamento dos campos eletromagnéticos e, assim, têm impacto direto sobre parâmetros fundamentais, como largura de banda e frequência de ressonância da FSS [1].

Na Figura 2.3 pode-se observar as duas categorias principais de superfícies seletivas em frequência e suas respectivas respostas em frequência características. Uma FSS formada por elementos do tipo abertura atua como um filtro passa-faixa, enquanto que com *patches* condutores a FSS possui característica de um filtro rejeita-faixa. Assim, esses arranjos periódicos se comportam de maneira complementar [2].

A forma geométrica dos elementos e suas dimensões estão ligados diretamente à frequência de ressonância da FSS.

Figura 2.3 – Tipos de elementos e características em frequência.

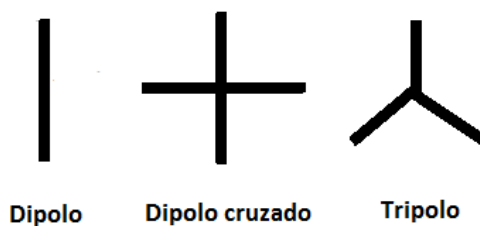


Fonte: [2].

Elementos das mais diversas formas geométricas são encontrados na literatura, sempre buscando uma resposta específica em frequência. São considerados comumente quatro tipos básicos de elementos (células unitárias), de acordo como foi dividido em [1].

Grupo 1: N-pólos conectados pelo centro, como o dipolo simples, o dipolo cruzado e o tripolo, ilustrados na Figura 2.4.

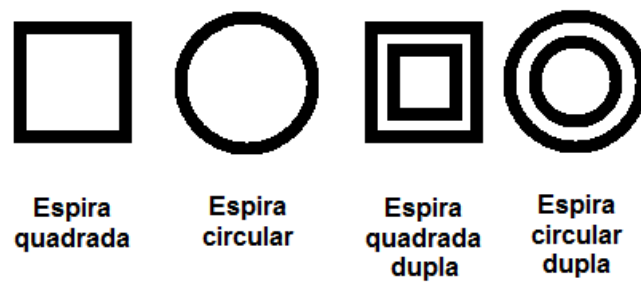
Figura 2.4 – N-polos conectados pelo centro.



Fonte: Próprio autor.

Grupo 2: O segundo grupo é formado pelas espiras, simples e compostas (duplas, triplas, etc.). A Figura 2.5 ilustra exemplos desses elementos.

Figura 2.5 – Espiras simples e duplas.



Fonte: Próprio autor.

Grupo 3: A Figura 2.6 ilustra elementos do tipo interior sólido. As formas geométricas mais comuns são a retangular/quadrada e circular.

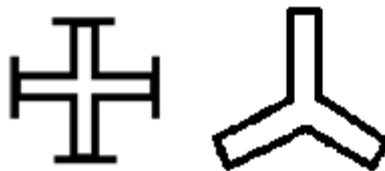
Figura 2.6 – Elementos de interior sólido.



Fonte: Próprio autor.

Grupo 4: A última classe de elementos é na verdade uma junção/combinação de elementos dos tipos citados anteriormente, como ilustra a Figura 2.7.

Figura 2.7 – Formas geométricas mistas.



Fonte: Próprio autor.

Cada elemento possui características específicas de banda de transmissão/reflexão e de ressonância. Dessa forma, a escolha correta do tipo de célula unitária é muito importante para alcançar a resposta em frequência desejada.

Além das formas e tipos dos elementos periódicos que constituem a FSS, outro parâmetro importante é o material da camada dielétrica e sua espessura [2]. Existe uma grande variedade de materiais utilizados como substrato dielétrico, para superfícies seletivas em

frequência. Basicamente, a escolha do material a ser empregado no projeto depende de sua permissividade elétrica relativa (ϵ_r), da permeabilidade magnética (μ_r) e do valor de sua tangente de perdas ($\tan \delta$). Em geral, são mais utilizados materiais com altas constantes dielétricas, permeabilidade magnética relativa unitária ($\mu_r = 1$), além de baixas tangentes de perdas e coeficientes térmicos mais próximos a zero (dessa forma, a resistividade da estrutura não se altera com o aumento da temperatura). Sendo as altas constantes dielétricas úteis principalmente quando se pretende trabalhar com miniaturização, pois uma maior constante dielétrica tende a reduzir as frequências de ressonância.

Outro ponto importante com relação ao desempenho de uma FSS é que sua resposta depende também da polarização e do ângulo de incidência da onda eletromagnética com relação à superfície. Considerando sistemas de telecomunicações sem fio, a onda incidente na superfície seletiva em frequência é polarizada, na forma horizontal, vertical ou circular/elíptica. Logo, ao considerar um elemento de tipo *patch*, por exemplo, este deve possuir frequência de ressonância na mesma polarização da onda incidente. O assunto de independência de polarização será melhor discutido posteriormente.

Os ângulos de incidência podem variar bastante, como no caso de FSS utilizadas em veículos aéreos e em comunicações móveis [10]. Assim, a estabilidade angular é uma característica a ser observada de acordo com a aplicação, sendo, normalmente, muito desejada.

O capítulo 3 abordará o tema principal deste trabalho, as superfícies seletivas em frequência complementares, juntamente com um estudo do atual estado da arte e exemplos de aplicações.

Capítulo 3

Superfícies Seletivas em Frequência

Complementares - CFSS

Este capítulo introduz o conceito básico das superfícies seletivas em frequência complementares, além de abordar suas principais características e aplicações, que as tornam uma alternativa interessante às FSS comuns.

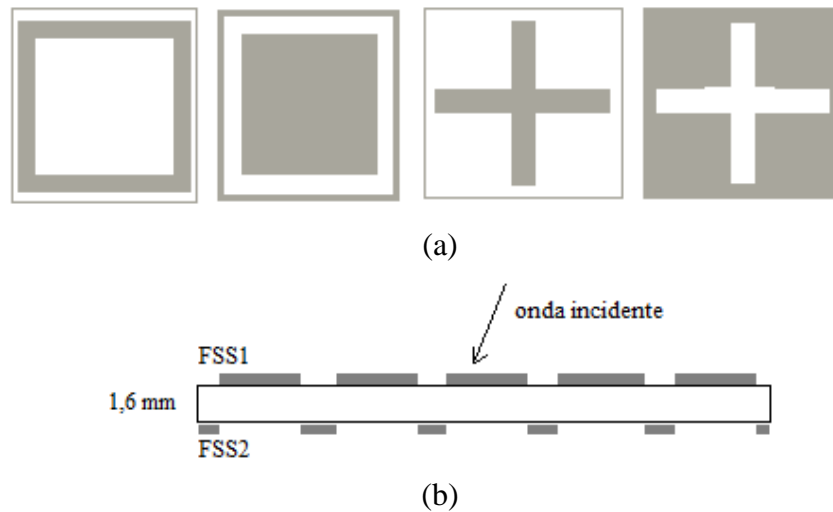
3.1 – Conceitos iniciais

Superfícies seletivas em frequência com *patches* metálicos ou do tipo bertura sobre uma única camada dielétrica são utilizadas há décadas devido a suas aplicações, principalmente na área de comunicação sem fio. Entretanto, esse tipo de estrutura tem resposta, na maioria das vezes, em uma única banda e, por muitas vezes, é suscetível à variação no ângulo de incidência, resultando em instabilidade angular [2], exigindo o uso de geometrias mais complexas das células unitárias para minimizar tais problemas.

Superfícies seletivas em frequência complementares (CFSS) são formadas por duas FSS juntas com elementos geométricos idênticos, sendo uma formada por elementos tipo *patch* e a outra por elementos do tipo abertura (*slot/aperture*), sendo, assim, uma complementar à outra. A Figura 3.1(a) ilustra células unitárias em formato de espira quadrada e dipolo cruzado (cruz) com suas respectivas partes complementares (elementos do tipo abertura), em que as partes mais escuras representam material condutor/metal.

Essas camadas são separadas por um substrato dielétrico que, além de interferir no comportamento eletromagnético da estrutura, serve também como sustentação. A Figura 3.1(b) ilustra a vista transversal da CFSS, considerando FSS1 como a camada com elementos do tipo *patch* e FSS2 a camada de elementos do tipo abertura. O forte acoplamento eletromagnético entre as camadas metálicas é o que torna a resposta em frequência das CFSS tão singular.

Figura 3.1 – (a) Espira quadrada e dipolo cruzado e suas respectivas partes complementares
(b) CFSS



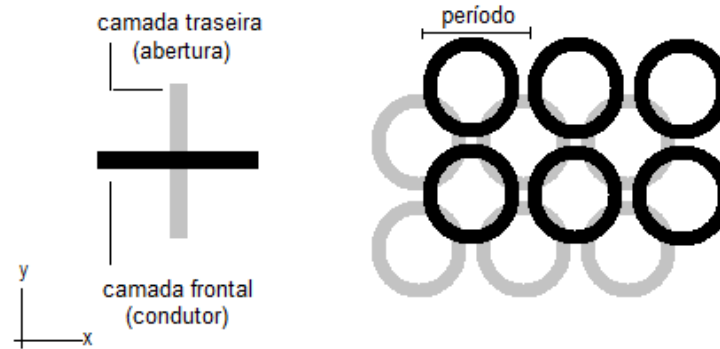
Fonte: Próprio autor

Estruturas do tipo CFSS partem do princípio de Babinet para estruturas complementares que diz que soma da onda transmitida através de uma FSS mais a onda transmitida através da FSS complementar seria a mesma se nenhuma FSS estivesse presente. Quando isoladas, as camadas de elementos tipo *patch* e abertura apresentam respostas complementares (ver Figura 2.2). O dielétrico entre as camadas faz com que as estruturas não sejam diretamente complementares na resposta em frequência segundo o teorema de Babinet, que considera apenas estruturas *free-standing* (estruturas sem dielétrico entre as camadas metálicas), porém o princípio é preservado. Na CFSS, devido à proximidade entre as camadas, ao entrarem em ressonância, estas produzem um forte acoplamento eletromagnético entre si devido às correntes e aos campos induzidos, fazendo com que as características de transmissão/reflexão das duas camadas interajam entre si, produzindo a resposta final da CFSS. O acoplamento entre as camadas metálicas é o principal responsável pela forte estabilidade angular desse tipo de FSS [8].

CFSS geralmente apresentam duas faixas de passagem estreitas e bem definidas com uma região de nulo entre elas (mais faixas podem ser alcançadas de acordo com a geometria utilizada [10]). O nível de acoplamento entre as camadas mostra-se como um importante parâmetro de ajuste no que diz respeito à resposta em frequência, sendo uma ferramenta útil na sintonização das faixas de operação. Conforme se altera a distância entre as camadas, as bandas passantes se tornam mais próximas ou mais distantes uma da outra. Como a principal variável que define o nível de acoplamento é a distância entre as camadas, a espessura do substrato dielétrico torna-se um fator decisivo no projeto da CFSS. No próximo capítulo essa variável será analisada juntamente com as outras dimensões físicas das estruturas propostas neste trabalho.

Ainda em [8], os autores demonstram que um desfasamento (*off-set*) entre as camadas influencia diretamente no acoplamento eletromagnético, servindo igualmente como parâmetro para controle das bandas de operação. Para elementos rotacionalmente não simétricos, como o dipolo linear, torna-se necessário uma rotação relativa de 90° entre os elementos para que se maximize o acoplamento, evidenciando as características da CFSS. Já para elementos simétricos, a maximização do acoplamento dá-se com um *off-set* de meio período nas direções x e y entre as camadas. A Figura 3.2 ilustra os métodos citados.

Figura 3.2 – Máximo acoplamento entre elementos de uma CFSS.



Fonte: Própro autor

3.2 – Aplicações

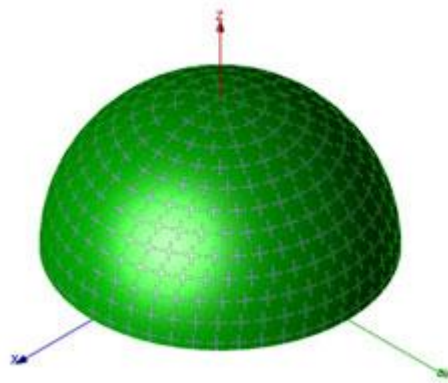
Devido às características específicas apresentadas na sessão anterior, as CFSS podem ser utilizadas em diversas aplicações.

A diminuição de seção transversal de radar (RCS) é uma aplicação na qual FSS são bastante empregadas afim de minimizar a reflexão na estrutura de aeronaves, dificultando a detecção por radares terrestres. A RCS é a medida da habilidade de um alvo refletir os sinais provenientes de radar na direção do receptor (próprio radar). O uso de superfícies seletivas em frequência complementares é uma excelente alternativa já que possui grande estabilidade angular, pois nesse tipo de aplicações as ondas incidentes podem atingir ângulos superiores a 60° , de acordo com o posicionamento da aeronave com relação ao radar [10].

Superfícies seletivas em frequência também são comumente empregadas em radomes, que são estruturas que funcionam como proteção e minimização de interferência eletromagnética, para antenas e respectivos circuitos eletrônicos, conforme ilustra a Figura 3.3. Além de evitar danos devido às condições climáticas adversas (chuva, ventos fortes, neve, etc.) podem possuir um papel importante para evitar interferências eletromagnéticas, garantindo a recepção/transmissão somente na banda de interesse. As CFSS, por possuírem faixas de transmissão estreitas em comparação

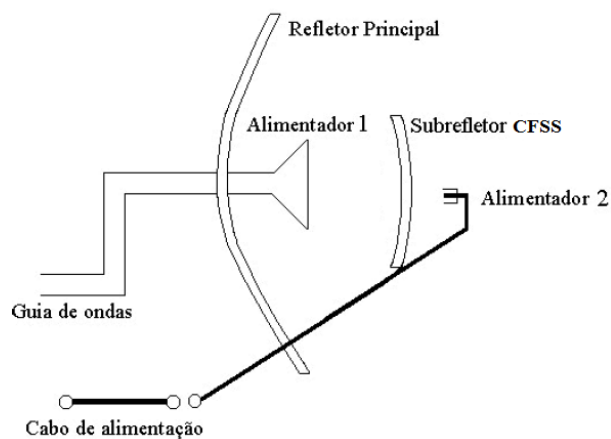
com as FSS comuns, podem ser bem utilizadas neste tipo de aplicação.

Figura 3.3 – FSS utilizada como radome [12].



Outra aplicação de grande interesse na qual as CFSS podem ser utilizadas é em sistemas de antenas refletoras de alto ganho, como ilustrado na Figura 3.4, em que o modelo Cassegrain é apenas um dos muitos possíveis [25]. Por possuir comportamento em múltiplas bandas de frequência, esse tipo de FSS pode atuar como um sub-refletor fazendo uso também de sua faixa de reflexão, possibilitando mais de uma alimentação no sistema. No decorrer desse trabalho esta aplicação será mais abordada.

Figura 3.4 – Antena Cassegrain com CFSS como sub-refletor.



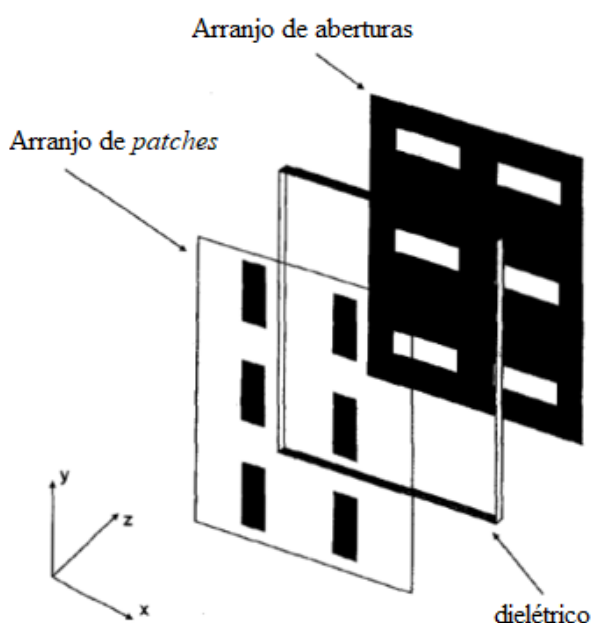
Fonte: [2].

Por fim, é interessante citar uma aplicação que foge um pouco da área de comunicação. Em [13-15], os autores utilizaram CFSS para medição de permissividade elétrica relativa (ϵ_r) de materiais dielétricos. Em [13], o esquema funciona adicionando-se um material dielétrico desconhecido atrás da CFSS e, conforme a espessura do dielétrico aumenta, a frequência de ressonância diminui. Assim, de acordo com a espessura do material e a variação da frequência de ressonância, a permissividade do material pode ser determinada.

3.3 – Estado da arte em CFSS

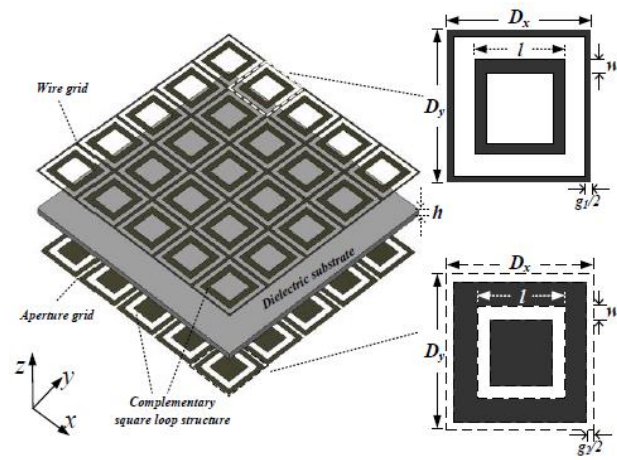
As superfícies seletivas em frequência complementares foram publicadas inicialmente por Lockyer *et al.* em 2000 [8]. Nesse trabalho, foi feita uma abordagem sucinta sobre esse tipo de estrutura, por meio de análises matemáticas utilizando o Teorema de Floquet, evidenciando suas principais características e controle da resposta em frequência. A Figura 3.5 ilustra uma das CFSS estudadas no trabalho citado.

Figura 3.5 – Estrutura inicialmente analisada em [8].

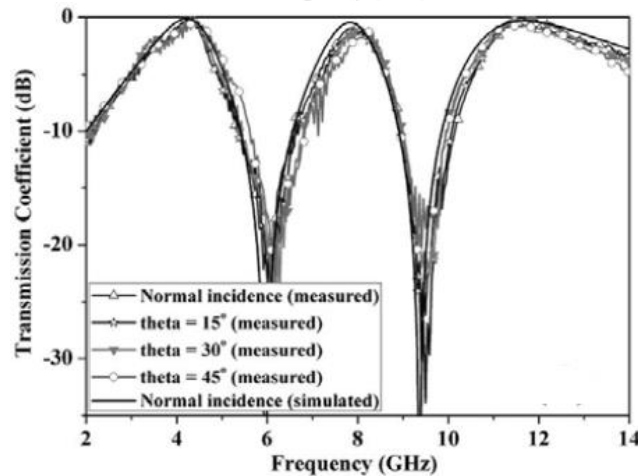
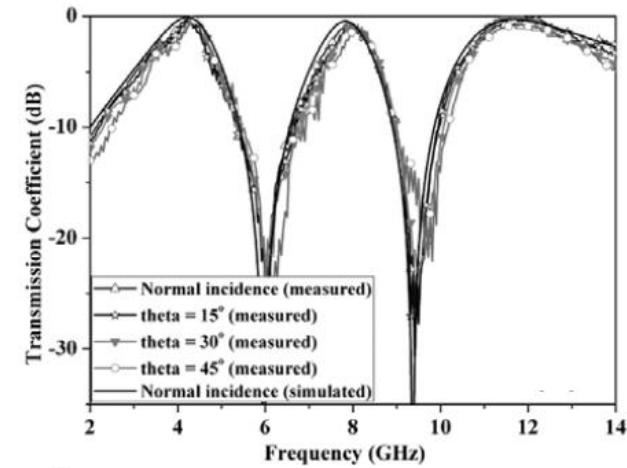


Espiras quadradas são geometrias bastante comuns em trabalhos sobre superfícies seletivas em frequência. Em CFSS elas também estão presentes em alguns trabalhos [16, 17]. Em [16], os autores propuseram uma CFSS com banda de transmissão tripla, por meio do uso de espiras quadradas com grade, apresentada na Figura 3.6. A estrutura, que possui espaçamento uniforme entre as bandas de transmissão, apresenta grande estabilidade angular para ângulos de até 45° e possui independência de polarização para os modos vertical e horizontal.

Figura 3.6 – CFSS proposta em [10]: (a) estrutura e (b) respostas simuladas e medidas.



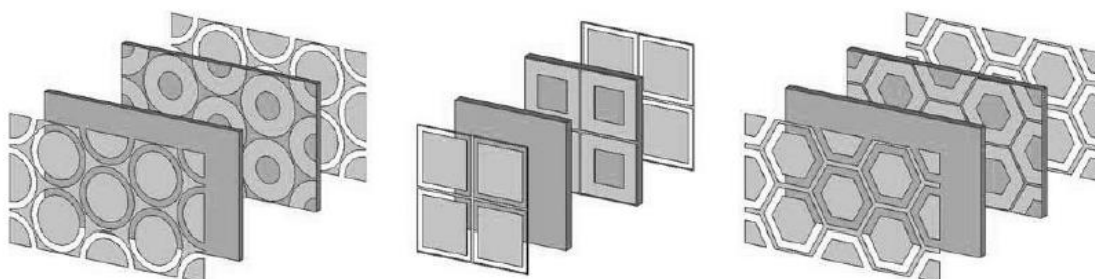
(a)



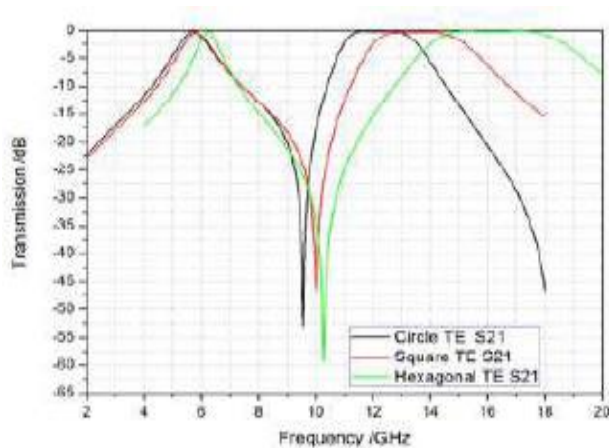
(b)

A técnica do cascadeamento também pode ser utilizada para construção de CFSS. Em [18], três novas geometrias (Figura 3.7(a)) são propostas como CFSS com resposta em banda de transmissão dupla. As CFSS apresentadas possuem grande estabilidade angular, tanto para a polarização vertical quanto para a horizontal, conforme indicam as figuras 3.7(b) e (c).

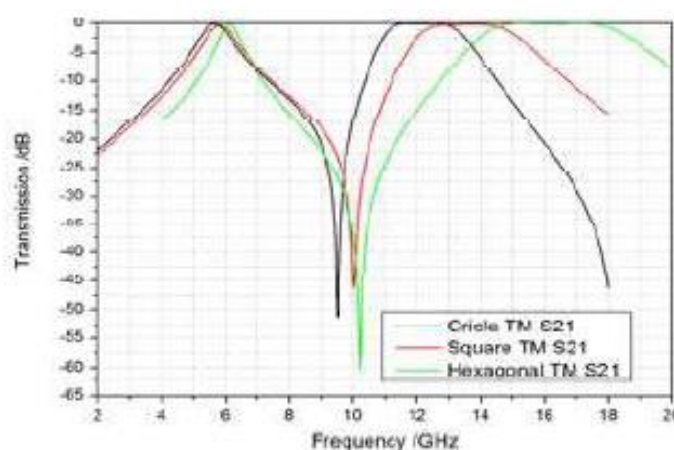
Figura 3.7 – CFSS por meio de cascadeamento em [18]: (a) geometrias propostas, (b) respostas da CFSS para cada geometria nas polarizações vertical e (c) horizontal.



(a)



(b)



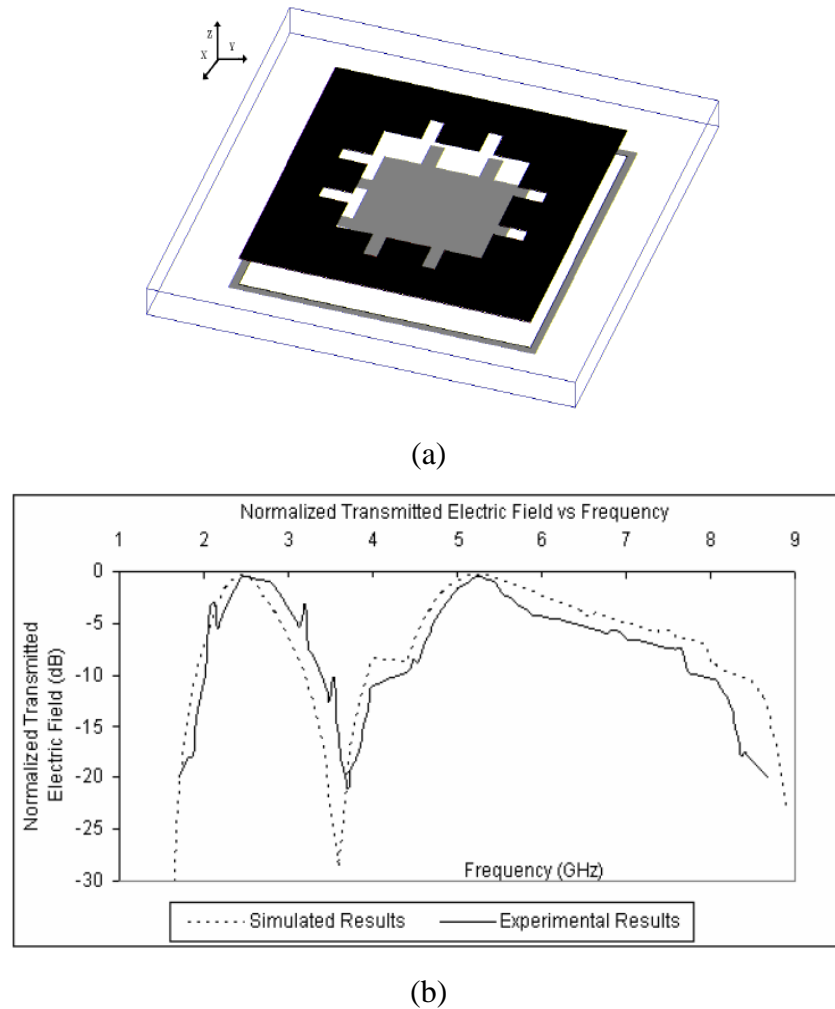
(c)

Pode-se observar, por meio dos gráficos apresentados, que a mudança de geometria da célula unitária, neste caso em específico, tem maior influência na segunda banda de transmissão.

Novas geometrias de células unitárias são sugeridas em [19, 20] para aplicações em WLAN e Wi-Max. Em [19] a geometria é fruto da variação de uma espira quadrada, ilustrada na Figura 3.8(a). A CFSS em questão possui duas bandas de passagem em frequências

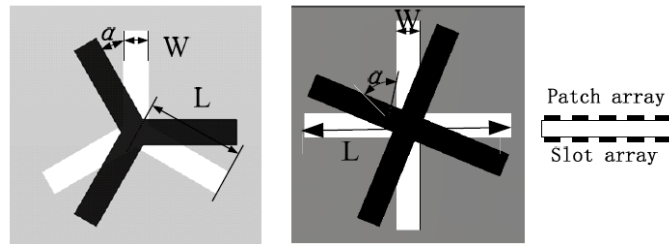
utilizadas por aplicações WLAN e apresenta boa concordância entre os resultados simulados e medidos, conforme pode-se comprovar ao analisar a Figura 3.8(b).

Figura 3.8 – CFSS proposta para aplicação em WLAN: (a) célula unitária e (b) comparativo entre os resultados simulados e medidos da estrutura [19].

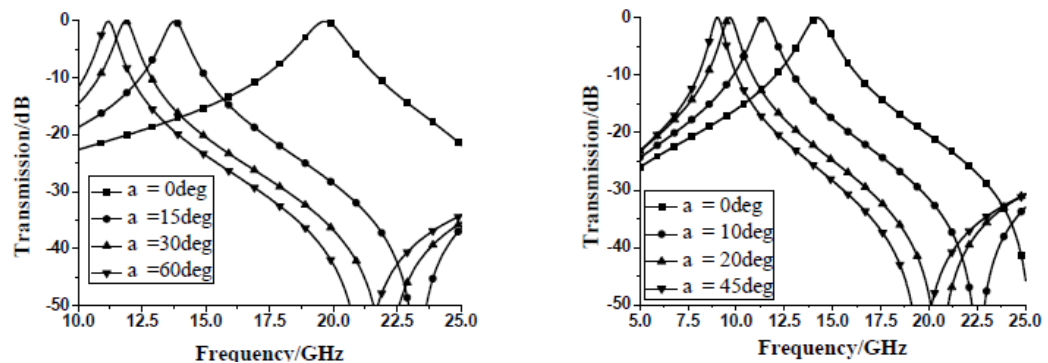


O método de controle da resposta em frequência por meio da rotação relativa entre as camadas metálicas da CFSS é estudado em [21] com o uso de duas geometrias ilustradas na Figura 3.9(a). O acoplamento entre as duas camadas é modificado conforme os elementos são rotacionados, modificando a resposta em frequência final da CFSS, se mostrando como um interessante método de ajuste (Figura 3.9(b), conforme discutido na Seção 3.1.

Figura 3.9 – CFSS estudada em [21]: (a) células unitárias analisadas e (b) respectivas respostas de acordo com ângulo de rotação [21].



(a)



(b)

A aplicação das superfícies seletivas em frequência complementares, apesar dos poucos estudos publicados sobre o tema, aparece bem diversificada na literatura científica, sendo os exemplos citados anteriormente apenas uma amostra do vasto espectro de possibilidades de uso desse tipo de estrutura, que pode incluir o uso nas chamadas *janelas inteligentes* que funcionam como filtros, bloqueando radiação infravermelha, porém sem prejudicar a entrada de sinais importantes em RF [22, 23]. Usadas também em hospitais e prédios penitenciários, visando principalmente o bloqueio de sinal de telefonia móvel [24] (que usa múltiplas faixas de frequência), além de outras aplicações, majoritariamente na área de telecomunicações.

No Capítulo 4, será proposto, simulado, construído e medido um novo modelo de CFSS para comunicações via satélite, podendo atuar como sub-refletor para sistemas de antenas de alto ganho nas bandas S, C e X, além de sua posterior modificação para uso como blindagem eletromagnética para sistemas 4G LTE.

Capítulo 4

Proposta de uma Nova CFSS com Geometria Simplificada

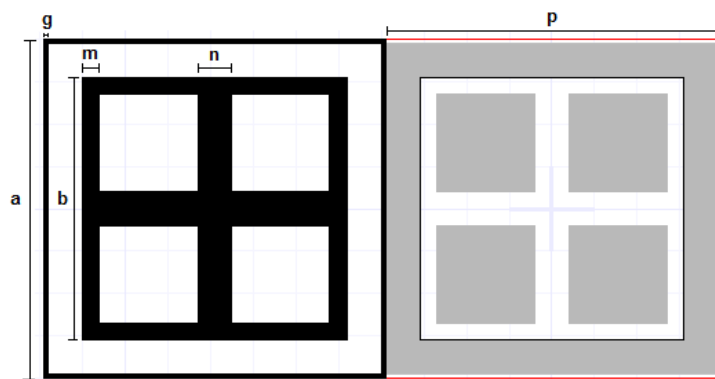
Este capítulo apresenta duas novas propostas de CFSS com respostas em frequência do tipo banda de transmissão dupla, que possam ser aplicadas em comunicações via satélite e em blindagem eletromagnética. Simulações são efetuadas por meio de uma completa análise paramétrica, visando um maior conhecimento sobre o comportamento da resposta em frequência em função das dimensões físicas das estruturas.

4.1 – Geometria inicialmente proposta

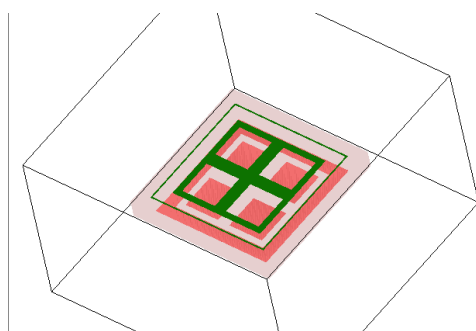
A primeira CFSS proposta parte da geometria básica proposta nesse trabalho, com a combinação duas geometrias já bem conhecidas na literatura científica. As células unitárias são formadas por espiras quadradas com grades, que, normalmente, apresentam boa estabilidade angular. Dentro de cada espira existe um dipolo cruzado, que, normalmente, apresenta um nulo de transmissão com banda estreita. A Figura 4.1 ilustra detalhes da célula unitária da estrutura (Figura 4.1(a)), bem como uma vista tridimensional da mesma (Figura 4.1(b)). Pode-se ver a célula tipo *patch* (em cor preta) e sua respectiva parte complementar (cinza). As camadas de elementos condutores e de abertura são separadas por um fino substrato dielétrico (FR-4), com permissividade elétrica relativa de 4,4, tangente de perdas 0,02 e espessura que depende da aplicação.

A geometria da célula unitária proposta partiu da escolha de formas simples, que facilitassem a construção de protótipos, e de características da resposta de frequência. De acordo com a literatura, arranjos periódicos de espiras com grade formam FSS com boa estabilidade angular, enquanto que o dipolo cruzado possui independência de polarização. Sendo definido o espectro de atuação da CFSS proposta e tendo por base o estudo apresentado em [16], chegou-se a medidas satisfatórias, com resposta em frequência nas bandas desejadas para cada uma das duas aplicações que serão apresentadas neste capítulo.

Fig. 4.1 – (a) Célula unitária *patch* e *slot* complementar (b) Célula unitária em ambiente de simulação.



(a)



(b)

4.2 – Aplicações das CFSS propostas

A primeira aplicação proposta nesse trabalho é uma CFSS para ser utilizada como sub-refletor, para um sistema de antena com alto ganho, com o uso de um refletor principal, que redireciona o sinal incidente sobre o mesmo para a CFSS, que devido às suas características de filtragem, funciona como um demultiplexador, separando as ondas eletromagnéticas por frequência e as encaminhando para seus respectivos alimentadores.

A Tabela 4.1 apresenta os valores das cotas da geometria inicial utilizada nas simulações. Tais valores foram atingidos a partir de Wang *et al*, em [16], com o ajuste fino feito de forma empírica, com uso das análises paramétricas mostradas a seguir.

Tabela 4.1 – Valores iniciais da célula proposta.

Dimensão física	a	b	g	m	N	P
Valor (mm)	8	6,2	0,1	0,4	0,8	8

4.3 – Simulações computacionais e discussão dos resultados para a aplicação como sub-refletor

Para uma verificação de cunho mais prático das propriedades das CFSS, nesta seção são realizadas simulações, utilizando o programa computacional comercial Ansoft Designer, com intuito de observar os diferentes comportamentos em frequência de acordo com mudanças paramétricas da geometria proposta e validar sua aplicação.

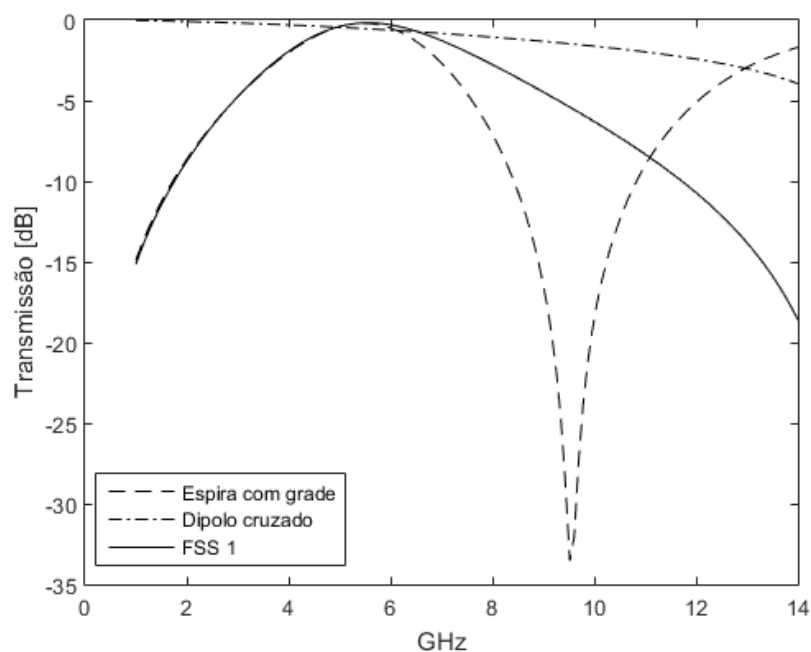
Análises paramétricas serão realizadas com o objetivo de observar o comportamento da resposta em frequência em função das dimensões físicas da CFSS. Para tais análises, um substrato dielétrico de FR-4 com 1,2 mm de espessura foi considerado. Para um melhor entendimento do leitor, nesse trabalho a banda de transmissão é compreendida como as frequências que apresentam valores do coeficiente de transmissão entre 0 e -3 dB, a banda de rejeição é compreendida como as frequências que apresentam valores do coeficiente de transmissão menor ou igual a -10 dB.

O efeito de cada geometria constituinte é apresentado na Figura 4.2. As respostas em frequência são dadas considerando ambos os lados da CFSS separadamente (Camada tipo *patch*/FSS 1 (Figura 4.2(a)) e camada de abertura/FSS 2(Figura 4.2(b)), bem como o efeito de ambas as camadas na resposta final da CFSS (Figura 4.2(c)).

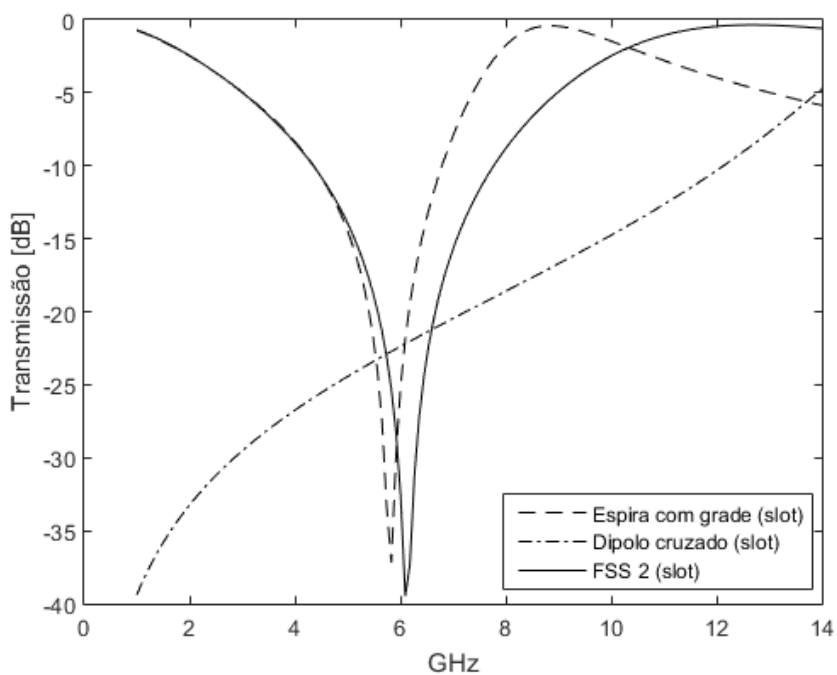
A Figura 4.2(a) mostra o efeito de cada parte da geometria na resposta em frequência considerando apenas uma camada de elementos, a FSS 1. Pode-se notar que a estrutura age, considerando os limites do espectro de 1 a 14 GHz, como um filtro espacial passa-faixa, com frequência central de ressonância próxima a 6 GHz. Uma resposta praticamente complementar em frequência é vista na Figura 4.2(b), em que é considerada uma FSS de elementos do tipo abertura com a geometria proposta (FSS 2). Por fim, na Figura 4.2(c) podemos notar as respostas em frequência das duas camadas (FSS 1 e FSS 2), quando formam a CFSS, interagindo entre si, produzindo duas faixas de transmissão, divididas por uma região de nulo. Importante ressaltar a contribuição em frequência de cada parte constituinte da geometria. As zonas de transmissão e reflexão interagem entre si chegando a um resultado “médio”.

Na Figura 4.2(c) pode-se observar a interação entre as duas camadas da CFSS. Nota-se que a camada denominada como FSS2 é a principal responsável pelo nulo de transmissão, que divide a faixa de passagem gerada pela FSS1.

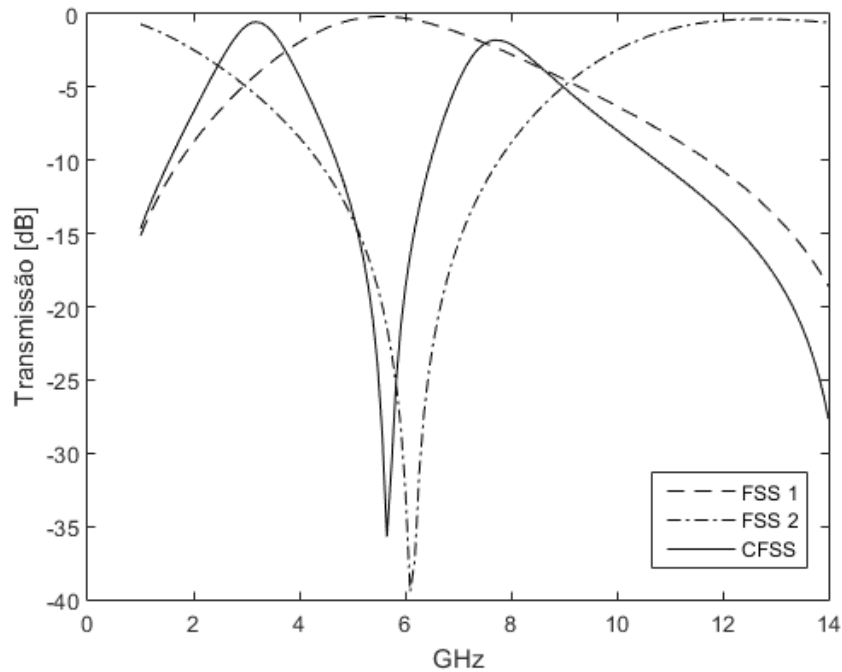
Figura 4.2 – Efeito em frequência das geometrias constituintes da CFSS. (a) para apenas elementos condutores, (b) para elementos do tipo abertura e (c) considerando CFSS.



(a)



(b)

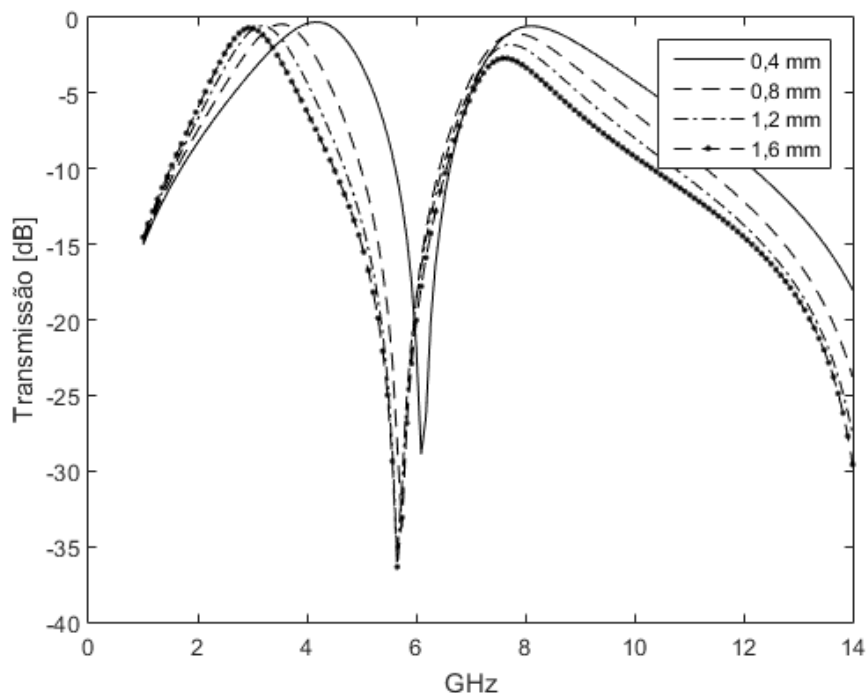


(c)

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.3 mostra a resposta em frequência para diferentes espessuras de substrato (FR-4), encontradas comercialmente, variando 0,4 mm até 1,6 mm. Como pode ser observado, a resposta em frequência da CFSS apresenta um comportamento em banda dupla, considerando o espectro de frequência de 1 a 14 GHz, com duas faixas de transmissão que apresentam alta seletividade separadas por um nulo (rejeição). Partindo de 0,4 mm, nota-se uma constante redução da frequência central das bandas de transmissão, conforme a espessura do substrato aumenta, com efeito mais acentuado na primeira faixa de passagem. Como já citado neste trabalho, a distância entre as camadas (espessura do substrato dielétrico) influencia diretamente no acoplamento eletromagnético, servindo de parâmetro para a sintonia das bandas. Nota-se também que, conforme a espessura do substrato aumenta, as ondas incidentes começam a atenuar principalmente nas frequências mais altas, como no caso da segunda faixa de transmissão. Partindo de uma aplicação em que seja exigida uma menor perda de inserção, a escolha de um substrato com menor tangente de perdas deve ser considerada.

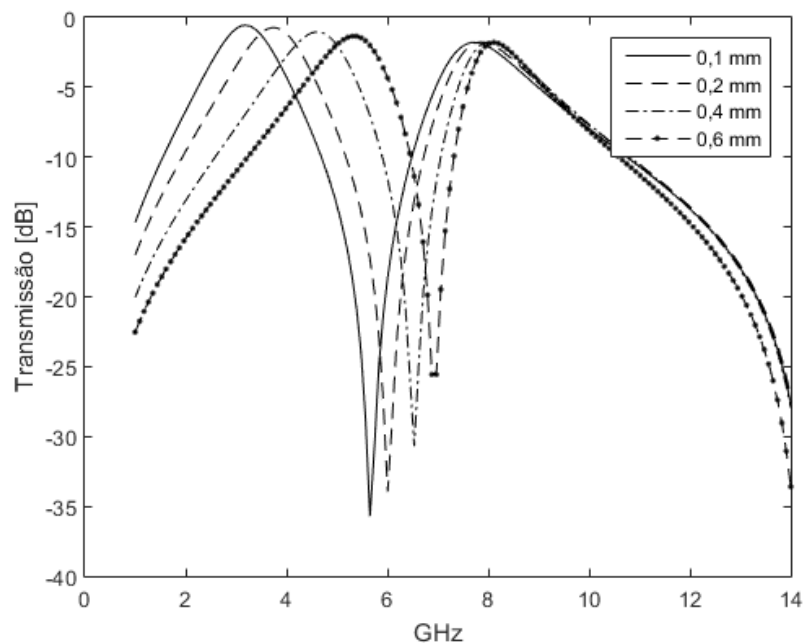
Figura 4.3 – Comparação das respostas de transmissão para diferentes espessuras de substrato FR-4.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.4 mostra a resposta para a variação da espessura g da espira quadrada externa (a grade formada possui espessura $2g$). A partir da Figura 4.4, observa-se que a alteração na largura da fita da grade condutora da célula unitária influencia diretamente na sintonia da primeira faixa de passagem (frequência mais baixa), aumentando sua frequência central de transmissão conforme a espira se torna mais espessa.

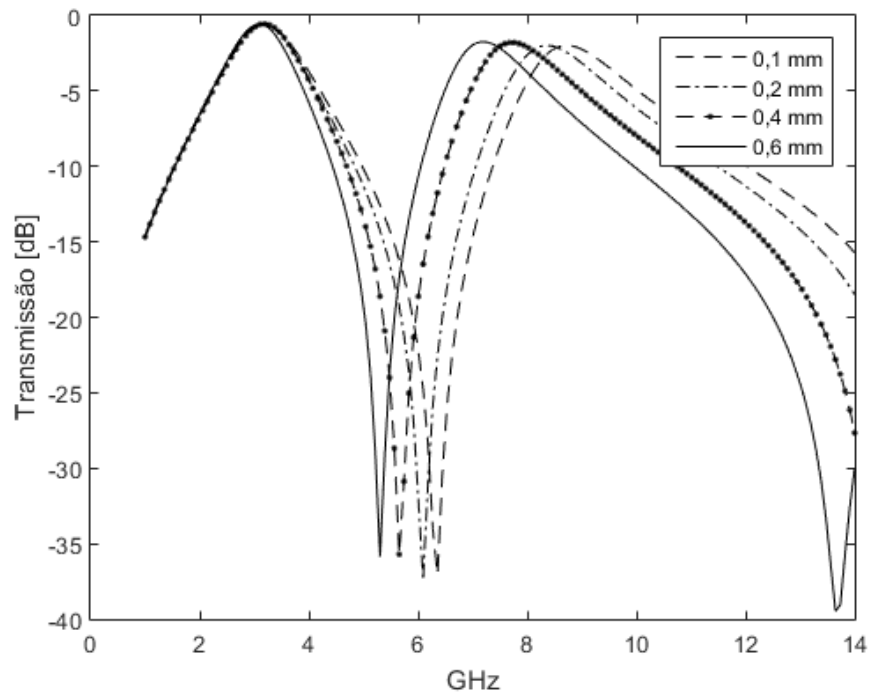
Figura 4.4 – Variação da espessura da espira quadrada externa.



Assim como a espessura da fita da grade, a modificação da espessura da espira quadrada também se mostrou como um bom parâmetro para a sintonia da resposta em frequência da CFSS, atuando predominantemente na segunda faixa de passagem enquanto que a primeira permanece, para fins práticos, inalterada. O comparativo entre diferentes valores de m é ilustrado na Figura 4.5.

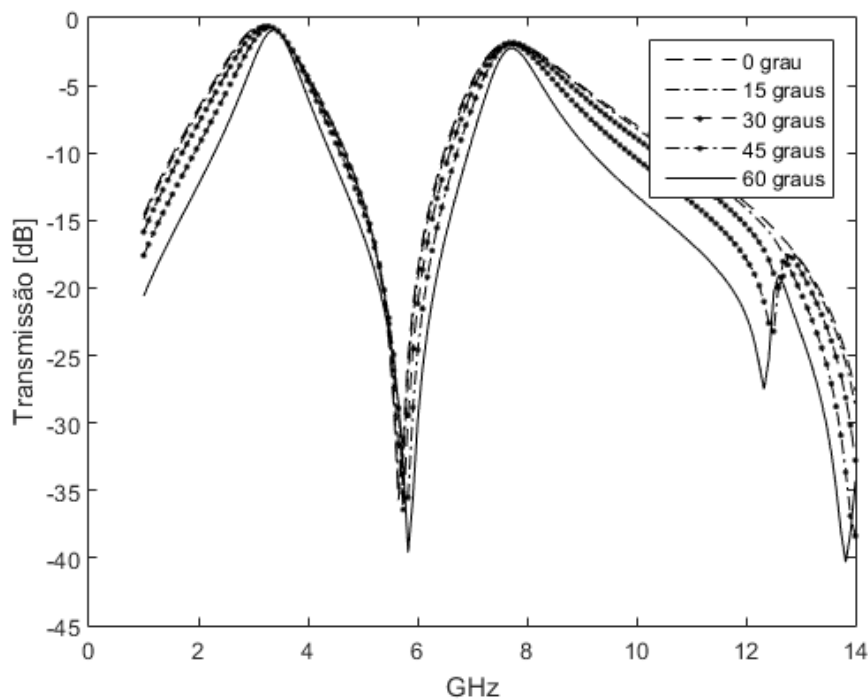
Para estudo da estabilidade angular da CFSS, a Figura 4.6 apresenta as respostas da CFSS considerando diferentes ângulos de incidência para ondas eletromagnéticas polarizadas nos modos horizontal (a) e vertical (b).

Figura 4.5 – Variação da espessura da espira quadrada interna.

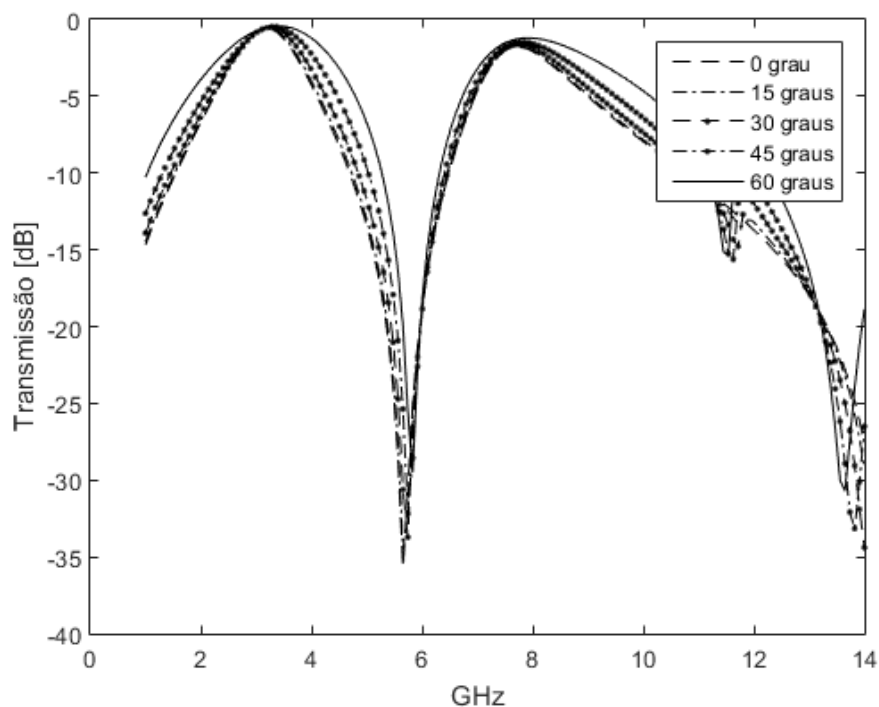


Fonte: Próprio autor.

Figura 4.6— Respostas para polarização horizontal (a) e vertical (b) com diferentes ângulos de incidência.



(a)



(b)

Tendo por base os dois gráficos anteriores, percebe-se a grande estabilidade da resposta em frequência para ângulos de incidência que chegam até 60° . Os resultados alcançados estão de acordo com a teoria apresentada no capítulo anterior, em que as superfícies seletivas em frequência complementares são apresentadas como filtros espaciais

estáveis angularmente.

Portanto, considerando as análises desenvolvidas, para a CFSS proposta, chegou-se a uma resposta final que permite que a mesma possa ser utilizada com um sub-refletor, tendo a capacidade de direcionar sinais nas bandas S (2 – 4 GHz), C (4 – 8 GHz) e X (8 – 12 GHz), bandas de frequência utilizadas comumente em aplicações via satélite.

4.4 – Modificação das dimensões da geometria inicial e nova aplicação.

A segunda aplicação proposta é uma superfície seletiva em frequência complementar para uso em blindagem eletromagnética. Blindagem eletromagnética é uma técnica usada para reduzir a intensidade de campos eletromagnéticos de uma faixa de frequências, em um local específico. Esta técnica geralmente faz uso de bloqueios construídos de materiais condutores e/ou magnéticos. O uso de superfícies seletivas em frequência para tal fim é indicado pois, de acordo com a aplicação, estas podem atuar permitindo a passagem de sinais em determinadas frequências bem como o bloqueio de outras [26, 27].

Com o crescimento das comunicações sem fio, tem-se observado um aumento significativo do número de estações rádio-base, para uma melhor cobertura de serviços. Como resultado colateral, existe uma alta probabilidade de interferência eletromagnética (*Electromagnetic interference* – EMI) dessas comunicações sem fio para outros dispositivos eletrônicos sensíveis. Para proteger os equipamentos sensíveis da ameaça potencial de EMI, há uma crescente demanda por blindagem arquitetônica. As blindagens convencionais são pesadas e adicionam cargas estruturais aos edifícios existentes [28]. Assim, blindagens de EMI que tenham peso reduzido, para serem aplicadas em paredes de um edifício, podem ser uma solução atrativa [29]. Além da questão do peso, os compartimentos metálicos convencionais não possuem características de proteção seletiva em frequência e, praticamente, bloqueiam ondas eletromagnéticas de todas as frequências. Para uma blindagem de EMI, que bloqueie apenas as frequências indesejáveis, um projeto usando superfícies seletivas de frequência (FSS) pode ser aplicado [30, 31].

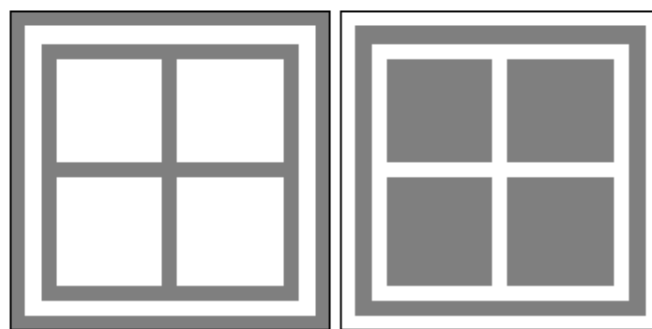
Muitas das aplicações de blindagem necessitam de uma resposta multibanda, apresentando faixas de passagem e rejeição de faixas estreitas nas frequências interferentes. A blindagem EMI deve rejeitar frequências indesejadas específicas sem afetar outros serviços sem fio, de preferência. Muitas estruturas propostas na literatura empregam FSS em cascata. A natureza dessas estruturas pode levar a uma blindagem relativamente espessa [32] – [34]. Por

outro lado, para implementar blindagens de uma única camada, geometrias complexas, de difícil construção, podem ser necessárias.

As superfícies seletivas em frequência complementares (CFSS) possuem características muito interessantes para esse tipo de blindagem. A possibilidade de funcionamento em múltiplas bandas abrange muito sua atuação, passando por satélites, radares, telefonia móvel e outras tecnologias que fazem uso de mais de uma banda de frequências. A massa adicional reduzida da CFSS adicionada ao sistema em que atua é um outro atrativo. Outra característica importante é a grande estabilidade angular proporcionada por esse tipo de filtro planar, sendo esse comportamento de extremo interesse principalmente em comunicações móveis sem fio. A alta seletividade da resposta em frequência também tem um papel importante no que diz respeito à filtragem de sinais com largura de banda bem definida e à minimização de interferências.

Mantendo a mesma forma geométrica utilizada nas simulações anteriores e alterando suas cotas, foi obtida uma resposta em frequência com um nulo na faixa dos sistemas de comunicações 4G LTE (2,50 - 2,69 GHz). As espessuras das fitas da grade, espira quadrada e do dipolo cruzado são de 1 mm. O comprimento da espira quadrada interna é de 16 mm, enquanto que o comprimento da grade e a periodicidade da célula são de 20 mm. O substrato utilizado é o mesmo (FR-4), com espessura de 1,6 mm. A Figura 4.7 ilustra as células unitárias da CFSS modificada.

Figura 4.7– Geometrias das células unitárias da CFSS (*patch*/abertura) proposta modificada.



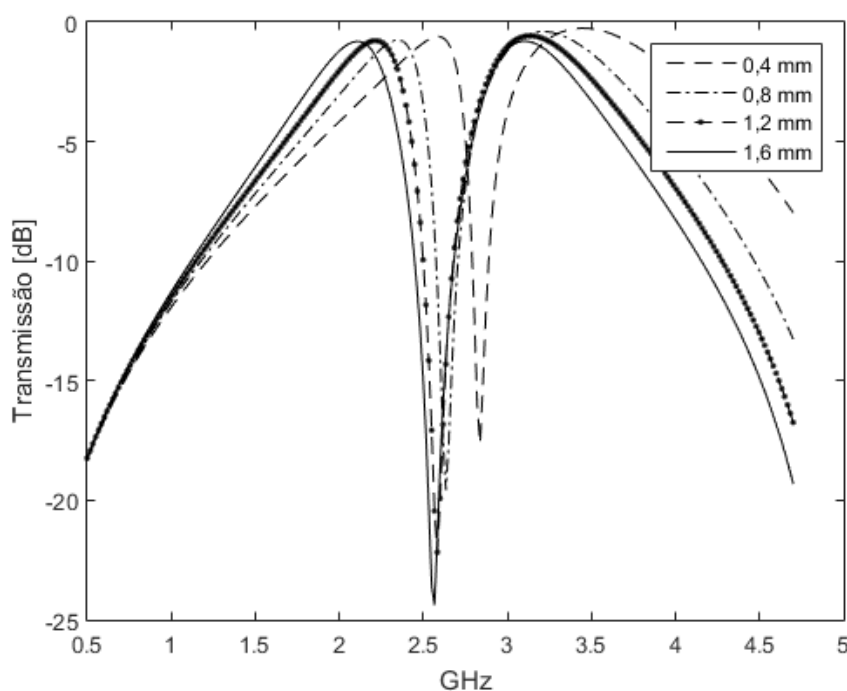
Fonte: Próprio autor

Assim, como foi feito para a CFSS aplicada a comunicações via satélite, a Figura 4.8 ilustra a variação da resposta em frequência da CFSS considerando alguns valores para a espessura do substrato. O resultado obtido foi semelhante ao da primeira estrutura. Conforme aumenta-se ou diminui-se a espessura do substrato, tem-se uma variação na resposta em frequência, cuja sintonia é mais evidente na primeira faixa de passagem.

Análises paramétricas também foram realizadas nas duas espiras quadradas das células unitárias. A Figura 4.9 ilustra a variação da espessura da espira externa, que mostra um maior efeito sobre a primeira faixa de transmissão, servindo como parâmetro de sintonia da faixa. Como essa primeira faixa está contida prioritariamente em bandas de frequência utilizadas por sistemas de telefonia móvel GSM (1700/1800/1900/2100), esse resultado permite o controle da filtragem, podendo-se, além de rejeitar a banda do LTE, também evitar a passagem de sinais em bandas específicas do GSM. A aplicação definirá o ponto exato da filtragem. Considerando um presídio, as paredes das celas e compartimentos poderiam ser revestidas com a CFSS, sendo, provavelmente, interessante rejeitar também outras possibilidades de comunicação por telefones móveis (celulares, *smartphones*), como ligações telefônicas que utilizam GSM. Permitindo, porém, o uso de outros tipos de equipamentos para comunicação úteis dentro do presídio (rádios pessoais de comunicação na faixa UHF comumente utilizados por carcereiros e guardas, por exemplo) sem afetar a qualidade do sinal.

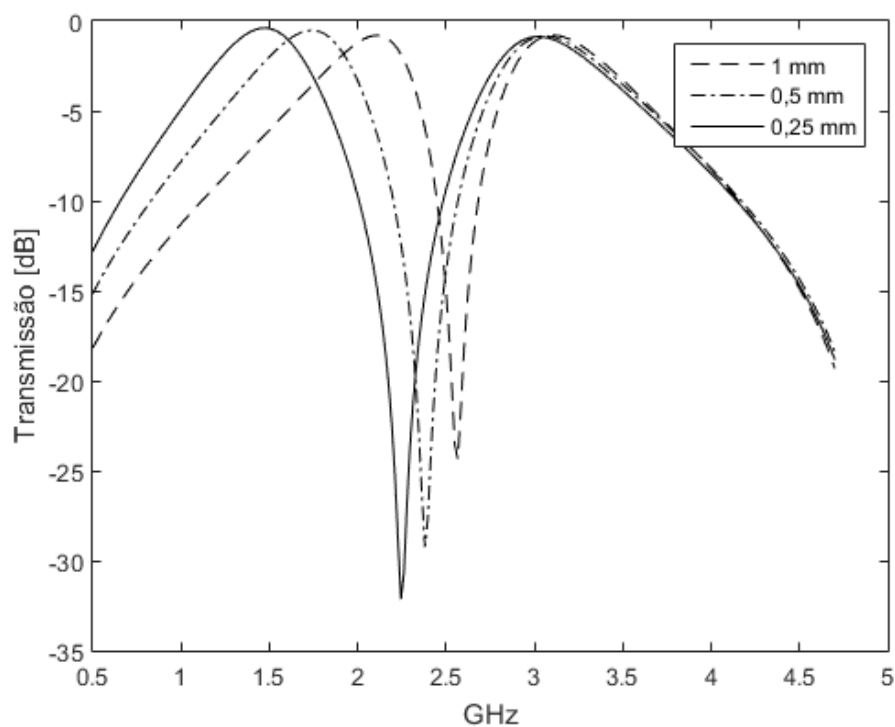
A Figura 4.10 mostra a variação na resposta em frequência de acordo com a variação da espira quadrada interna. Com resultado esperado, agindo na sintonia da segunda banda de passagem, esta simples variação paramétrica permite que seja definida a filtragem de sinais que operam no início da faixa SHF (3 – 30 GHz), como o WiMAX (3.5 GHz) e outras aplicações que fazem uso de espectros próximos.

Figura 4.8 – Variação da espessura do substrato dielétrico FR-4 para segunda CFSS.



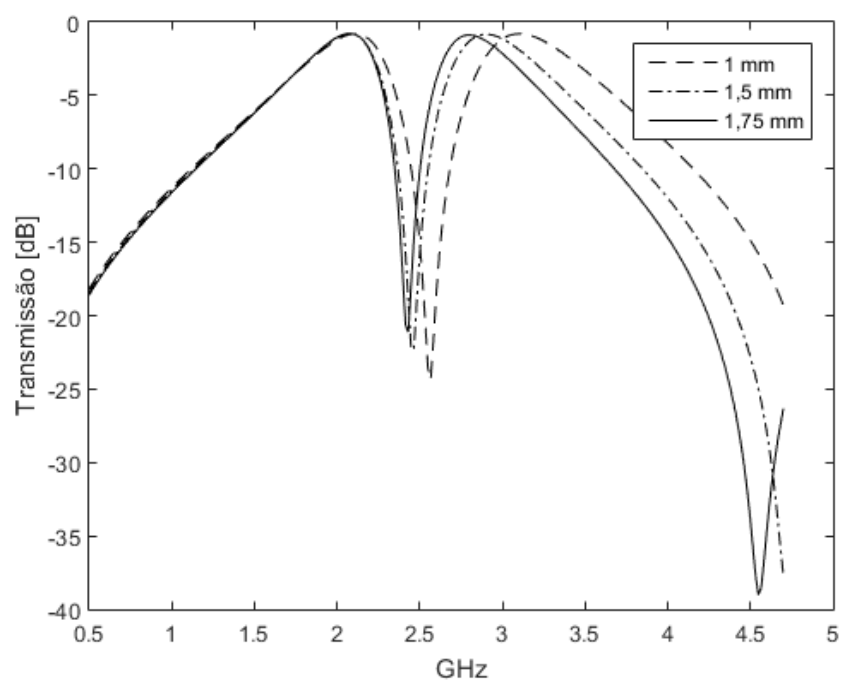
Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.9 – Variação da espira externa da célula unitária da segunda CFSS.



Fonte: Próprio Autor

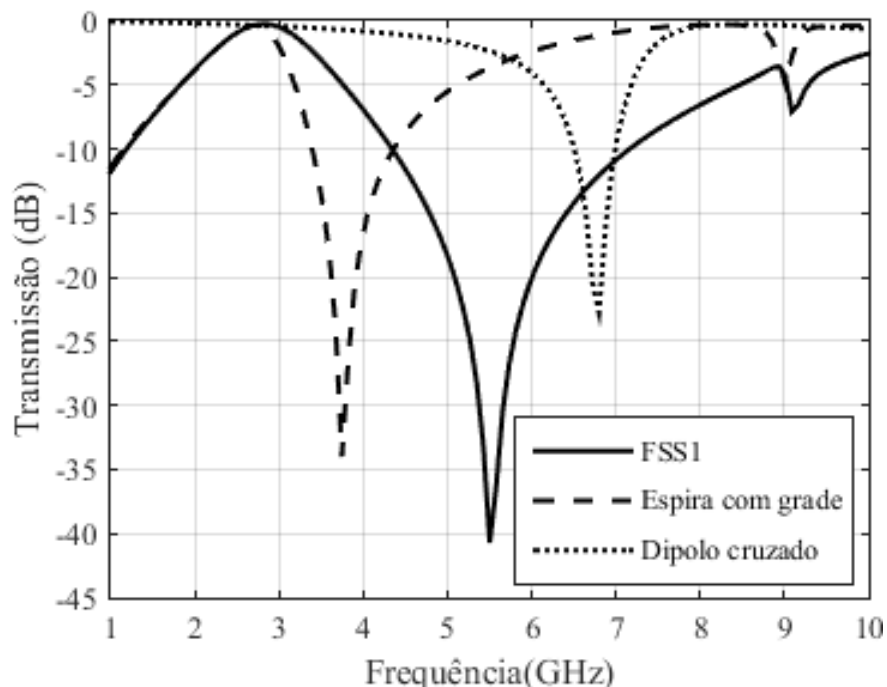
Figura 4.10 – Variação da resposta em frequência devido à mudança da espessura da espira interna.



A Figura 4.11 apresenta a transmissão, isto é, a magnitude do parâmetro de dispersão S_{21} , considerando apenas a camada com elementos do tipo *patch* (FSS1). Verifica-se que, quando se tem apenas o dipolo cruzado a ressonância ocorre em 6,80 GHz, produzindo uma faixa de rejeição muito estreita de 0,50 GHz. Considerando apenas a espira quadrada com grade, a FSS ressoa em 3,75 GHz, exibindo uma faixa de rejeição de 1,00 GHz, aproximadamente. Quando se combina ambos os elementos, uma faixa de passagem com ressonância em 2,83 GHz na faixa de 2,11 – 3,48 GHz é alcançada em – 3 dB. Pode-se notar que as duas primeiras faixas de passagem das estruturas separadas geram uma resposta passa-faixa na faixa de interesse (1 – 5 GHz). Isto é devido ao efeito de acoplamento mútuo desenvolvido quando o dipolo cruzado é carregado com a espira quadrada com grade sobre o substrato.

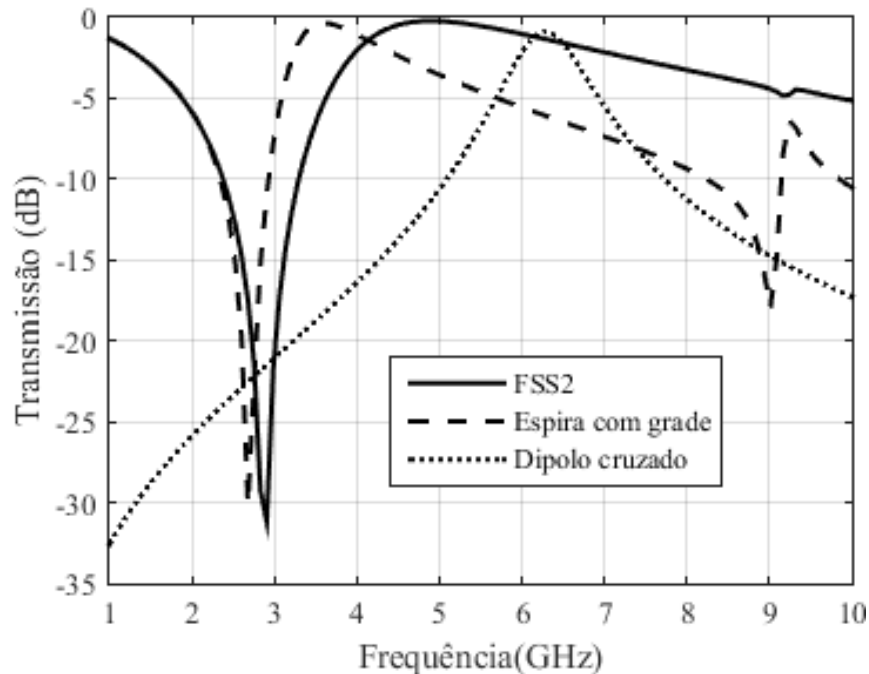
Considerando apenas a camada de elementos de abertura (chamada de FSS2) os resultados das simulações são, no geral, complementares, como esperado. As respostas em frequência das estruturas separadas que compõem a camada são mostradas na Figura 4.12.

Figura 4.11– Compação da transmissão através da FSS com elementos do tipo *patch* com apenas o dipolo cruzado, com apenas a espira quadrada com grade e com ambas as geometrias.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 4.12– Compação da transmissão através da FSS com elementos do tipo abertura com apenas o dipolo cruzado, com apenas a espira quadrada com grade e com ambas as geometrias.

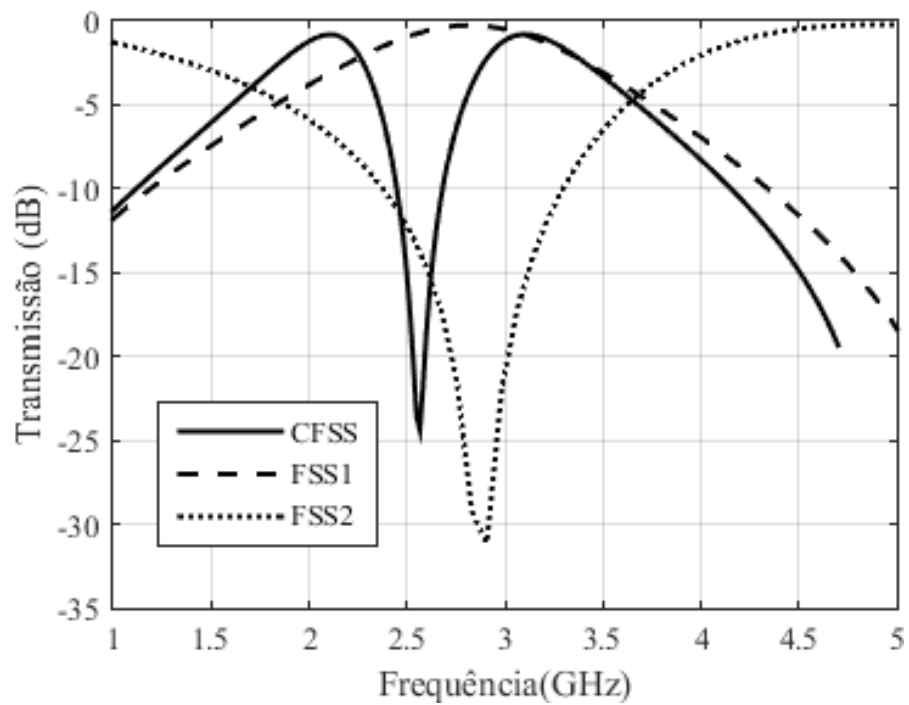


Fonte: Próprio Autor.

Quando combinamos as duas camadas (FSS1 e FSS2), formando a CFSS, pode-se observar que a estrutura se comporta como um filtro com duas bandas de passagens bem definidas com um nulo entre elas, como mostra a Figura 4.13. A primeira faixa de passagem está centrada em 2,11 GHz, produzindo uma faixa de passagem de 600 MHz (1,72 – 2,32 GHz). A segunda faixa de passagem está centrada em 3,11 GHz, produzindo uma faixa de passagem de 730 MHz (2,83 – 3,56 GHz). A faixa de rejeição tem ressonância em 2,57 GHz na faixa de 2,45 – 2,69 GHz considerando – 10 dB. Como as estruturas estão na região de campo próximo uma com relação à outra, pode-se observar um forte acoplamento mútuo, modificando a resposta resultante e fornecendo a resposta desejada.

Considerando a resposta alcançada, a CFSS pode ser utilizada em projetos de blindagem eletromagnética na faixa de sistemas 4G LTE refletindo sinais nesta banda de frequência. Porém, permitindo a passagem de outros possíveis sinais de interesse como GSM 1700/1800/1900/2100 e WiMAX 3,5 GHz, conforme Figura 4.13.

Figura 4.13– Comparação da transmissão através da CFSS completa e suas partes constituintes.



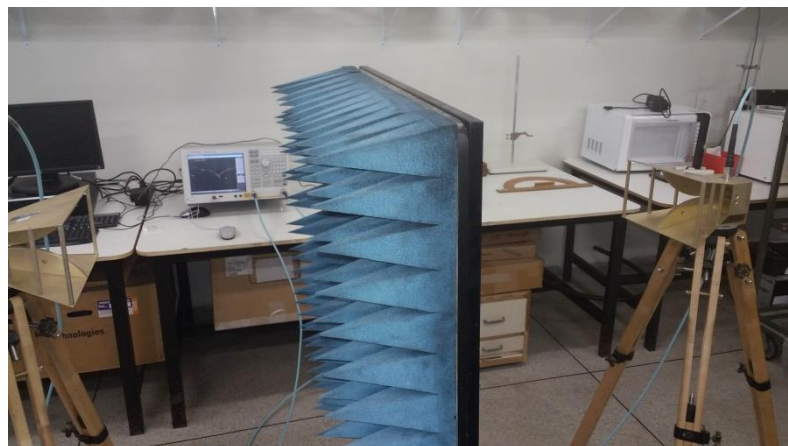
Fonte: Próprio Autor

Capítulo 5

Construção de protótipos, medição e discussão de resultados

Com fins de validação das simulações efetuadas, foram construídas as duas CFSS propostas neste trabalho. A técnica utilizada para a fabricação foi por corrosão, semelhante como é feito em placas de circuito impresso. O substrato usado foi o mesmo das simulações, FR-4. As medições foram realizadas em novembro de 2017, no Instituto Federal da Paraíba (IFPB), campus de João Pessoa. A Figura 5.1 ilustra o *setup* de medição.

Figura 5.1– *Setup* de medição.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados experimentais foram obtidos no Laboratório de Micro-ondas do GTEMA/IFPB, utilizando um analisador vetorial de redes do fabricante Agilent modelo E5071C, duas antenas cornetas (*horn antennas*) do fabricante A. H. Systems, modelo SAS-571 (700 MHz a 18 GHz), posicionadas em linha de visada direta, como mostra a Figura 5.1.

5.1 – CFSS para comunicações via satélite.

Na Figura 5.2 pode-se ver a CFSS inicialmente construída pronta para a medição, entre duas antenas cornetas de banda larga.

Figura 5.2– CFSS para comunicações via satélite construída posicionada para a medição.

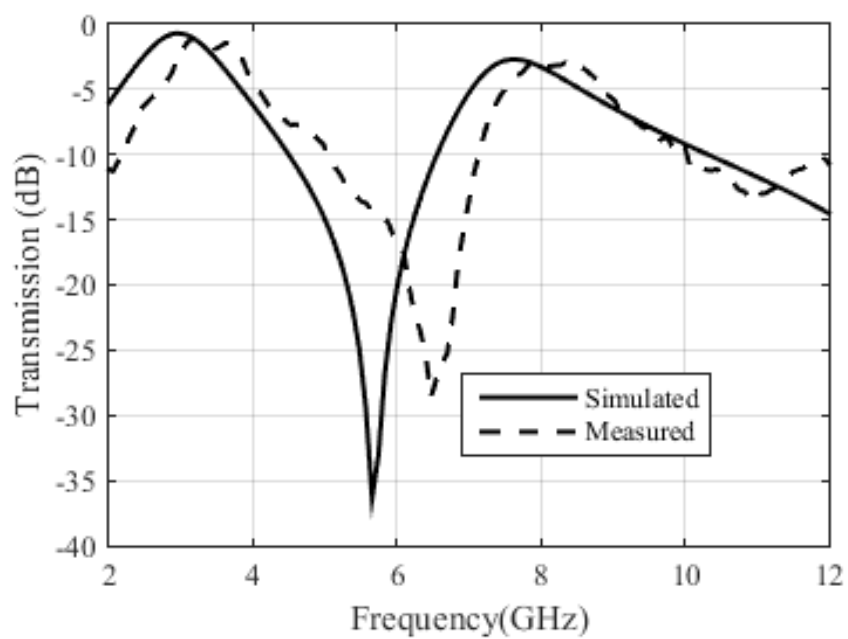


Fonte: Próprio autor.

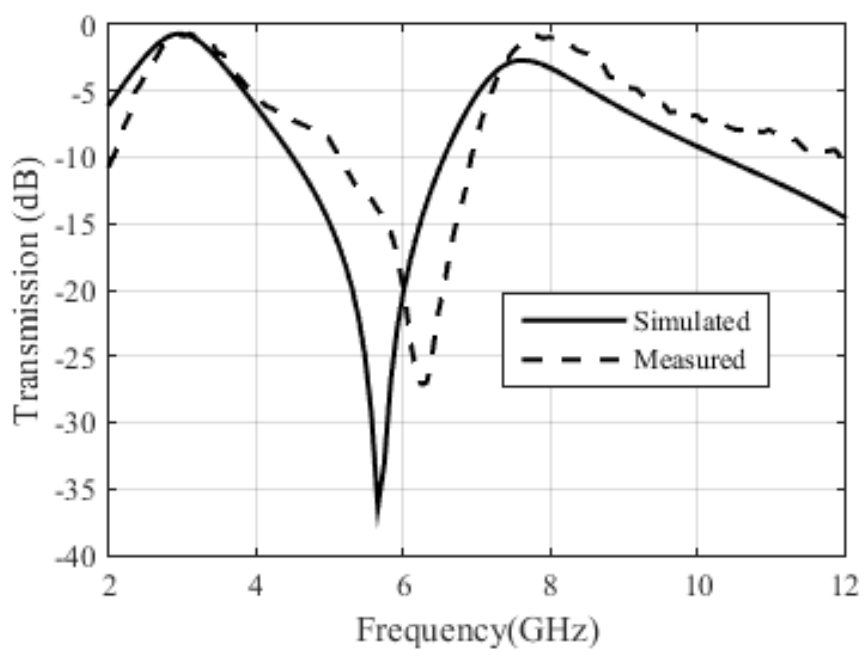
A comparação entre os resultados simulados e medidos, para ambas as polarizações pode ser vista na Figura 5.3. Percebe-se uma diferença principalmente no que se diz respeito à frequência central de nulo, de cerca de 1 GHz, com menor comprometimento das bandas de transmissão. É importante ressaltar que tal CFSS foi confeccionada a partir de duas FSS separadas que foram unidas. Dificuldade no alinhamento das duas estruturas pode ter sido o principal motivo da diferença dos resultados medidos e simulados.

A verificação da estabilidade angular da CFSS é bem facilitada pelas figuras 5.4 (a) e (b). Percebe-se a grande estabilidade angular já esperada da estrutura, conforme a teoria abordada em capítulos anteriores. A resposta em frequência permanece praticamente inalterada conforme se varia o ângulo de incidência.

Figura 5.3– Comparativo entre resultados simulados e medidos nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical.



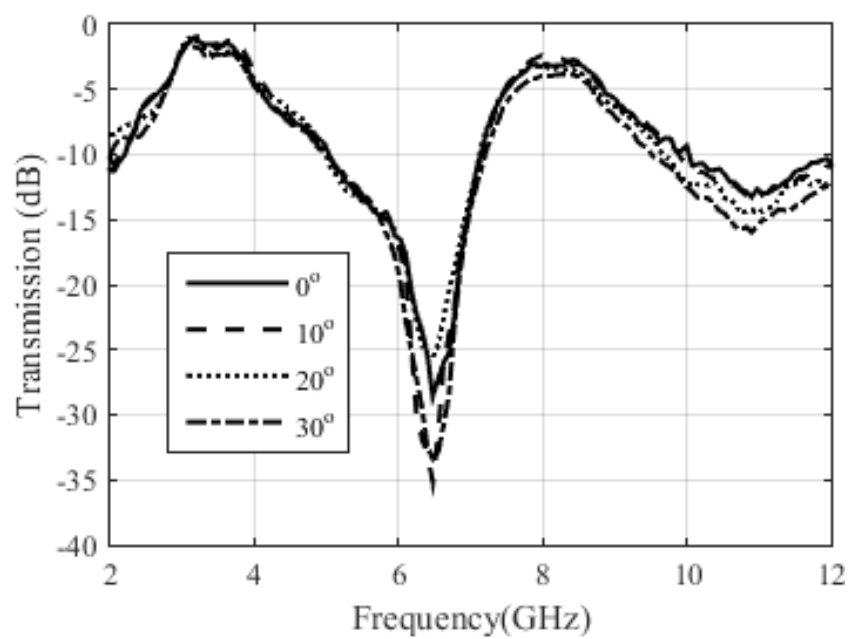
(a)



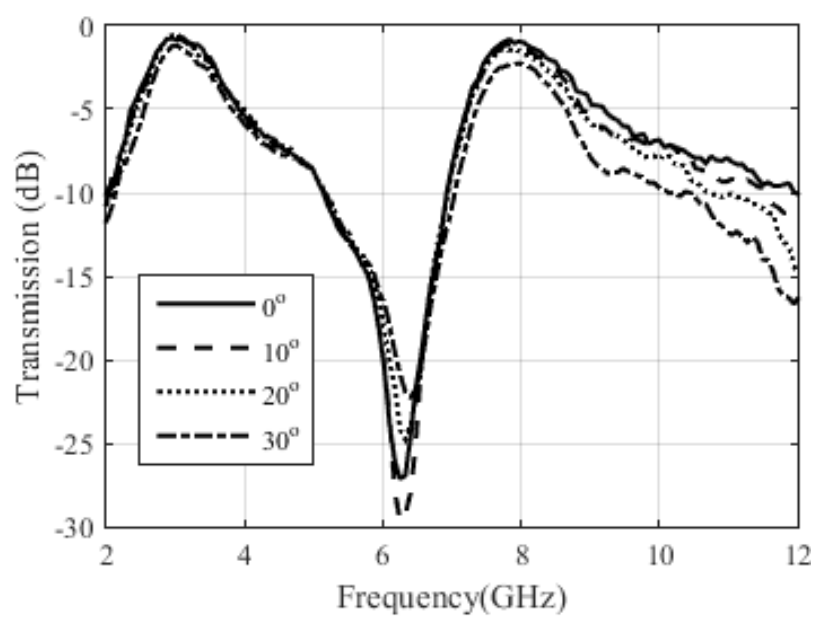
(b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.4– Medição da variação angular da CFSS medida nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical.



(a)



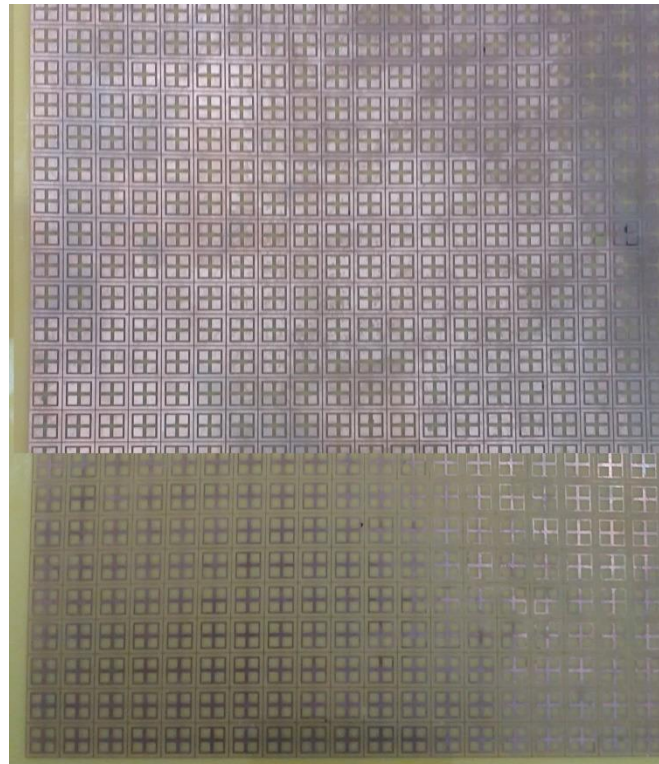
(b)

Fonte: Próprio autor.

5.2 – CFSS para blindagem eletromagnética de sistemas 4G LTE.

A Figura 5.5 ilustra uma foto da CFSS proposta para revestimento predial, atuando como blindagem eletromagnética. A Figura 5.5 ilustra tanto a face *patch* (FSS1) quanto à sua parte complementar do tipo abertura, no lado oposto da estrutura planar.

Figura 5.5– Faces da CFSS construída para blindagem eletromagnética.

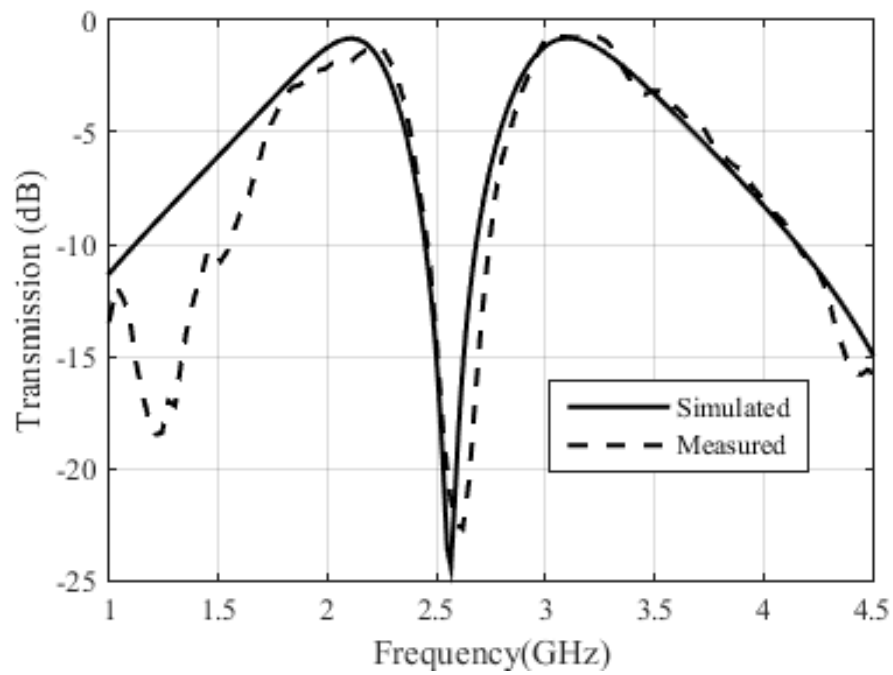


Fonte: Próprio autor.

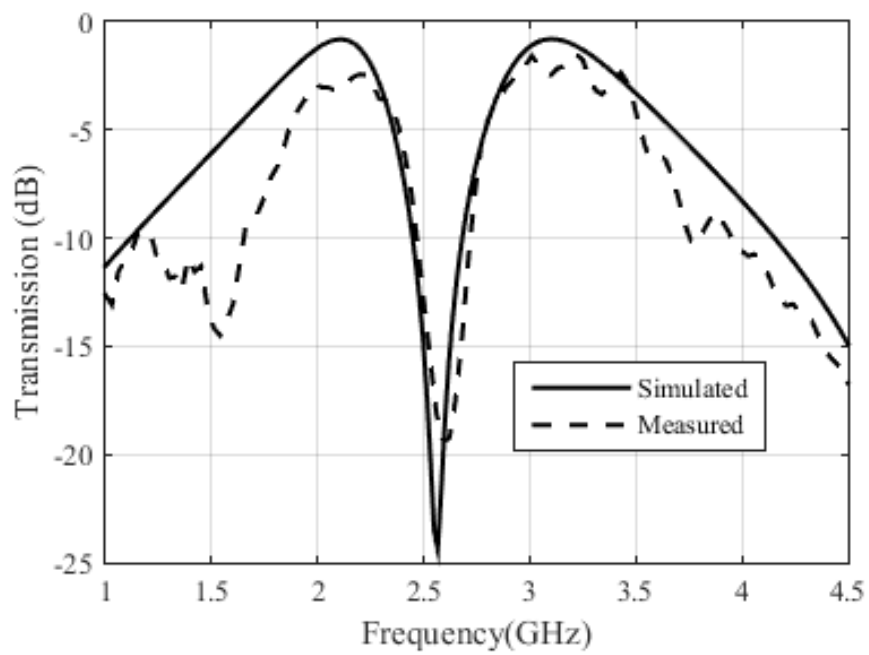
Como o protótipo dessa CFSS foi construído sobre uma placa única, o problema de centralização das camadas foi minimizado. Observa-se uma boa concordância entre os resultados simulados e medidos. A frequência central de nulo alcançada nos resultados medidos habilitam a CFSS para atuar como elemento de blindagem eletromagnética para sistemas 4G LTE. A Figura 5.6 ilustra a comparação entre os resultados simulados e medidos.

Na análise da resposta em frequência da CFSS variando-se o ângulo de incidência da onda eletromagnética (Figura 5.7) também obteve-se um boa concordância entre os resultados para a estabilidade angular, mais uma vez comprovando essa característica para esse tipo de FSS.

5.6 - Comparativo entre resultados simulados e medidos nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical para a segunda CFSS.



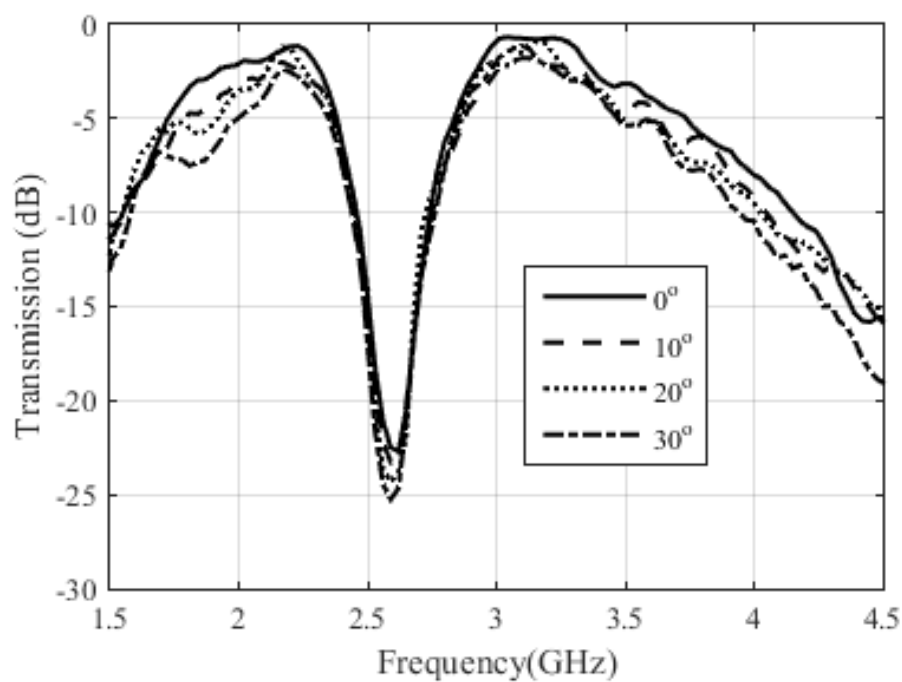
(a)



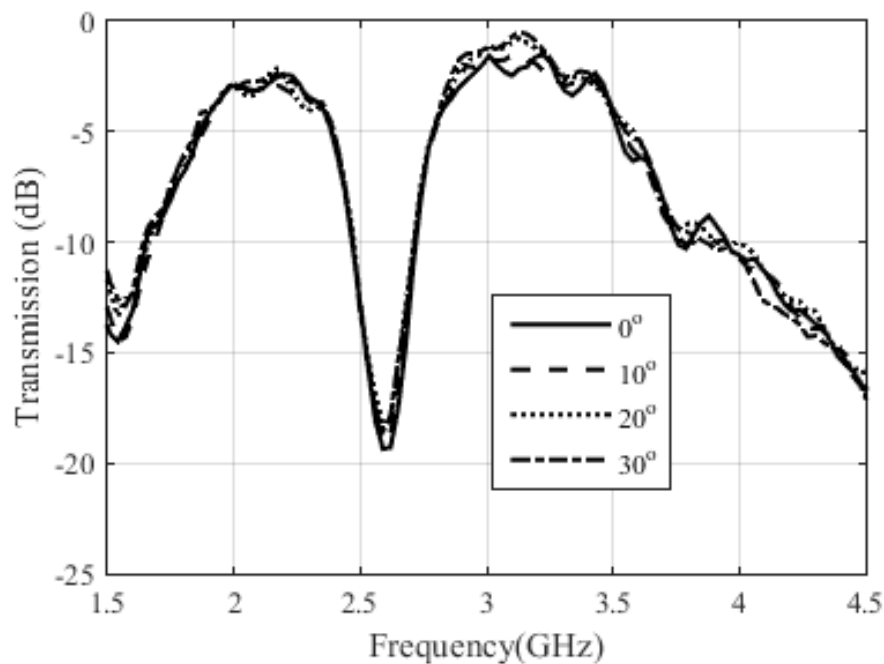
(b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 5.7– Medição da variação angular da CFSS medida nas polarizações (a) horizontal e (b) vertical.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Capítulo 6

Conclusões

Esta dissertação de mestrado apresentou uma discussão sobre as superfícies seletivas em frequência complementares (CFSS), um tipo de superfície seletiva em frequência (FSS), composta por duas camadas metálicas com elementos complementares. Simulações, envolvendo um detalhado estudo paramétrico das estruturas proposta foram realizadas, para um melhor entendimento do comportamento da resposta em frequência das estruturas, com relação a suas dimensões físicas.

No decorrer do trabalho, foram evidenciadas as principais características das CFSS e foram apontadas aplicações de interesse na área de comunicação sem fio. O estado da arte foi analisado amplamente e serviu de base para um melhor entendimento sobre o assunto. Duas aplicações atuais de interesse foram abordadas.

Inicialmente, uma nova geometria, nunca encontrada na literatura, foi proposta e a análise paramétrica inicial permitiu chegar a dimensões físicas que possibilitaram a aplicação da estrutura proposta em comunicações via satélite. A estrutura apresentou duas bandas de passagem nas bandas C e X e um forte nulo na banda S, proporcionando alto grau de seletividade (bandas estreitas) nas faixas de passagem e rejeição, além disso, a estrutura é de baixo peso e custo, devido aos materiais utilizados e a sua fácil confecção.

Uma modificação nas dimensões físicas da geometria da CFSS inicialmente proposta levou a uma nova estrutura com resposta em frequência diferente e, conseqüentemente, uma nova aplicação foi considerada. Essa segunda CFSS foi projetada para uso em blindagem eletromagnética, para bloqueio de sistemas 4G LTE, na faixa de frequência de 2,5 a 2,69 GHz.

A alta seletividade (faixas estreitas) nas bandas de transmissão e a grande estabilidade angular mostram que as CFSS propostas constituem-se em boas escolhas para as aplicações sugeridas, porém podendo serem também utilizadas em outras aplicações que compartilhem o mesmo espectro de funcionalidade. A partir das simulações computacionais, foi demonstrado que variações nas dimensões físicas possibilitam o controle, tantos das bandas de passagem quanto da banda de rejeição, possibilitando uma sintonia fina da resposta em frequência. Simulações também demonstraram a grande estabilidade angular da estrutura, com ângulos de incidência de até 60°.

Por fim, para validar as simulações realizadas, dois protótipos foram construídos e medidos, alcançando uma boa concordância com os resultados simulados.

As superfícies seletivas em frequência complementares se mostram como fortes candidatas para serem utilizadas em sistemas de comunicação modernos, principalmente nos que trabalham em múltiplas e estreitas faixas de frequência. A possibilidade da confecção de estruturas leves e de baixo custo enriquecem mais ainda o interesse no estudo e na aplicabilidade das CFSS.

Como proposta para trabalhos futuros sobre o tema, podem ser citados: o estudo dos fenômenos eletromagnéticos ocorridos na interação entre as camadas metálicas das superfícies complementares seletivas em frequência; proposição de novas geometrias; proposição de projeto de CFSS com múltiplos nulos e aplicação de técnicas de inteligência computacional para projeto de CFSS.

Referências Bibliográficas

- [1] MUNK B.A. “Frequency selective surfaces: theory and design”. New York (NY): Wiley; 2000.
- [2] CAMPOS, A. “Superfícies seletivas em frequência : análise e Projeto”, IFRN Editora, Natal. 2009. .196 p.
- [3] H. Wang, X. Sun, W. He, Y. Wang and Y. Wang, "The Design of Multi-bandpass FSS," *2015 IEEE 12th Intl Conf on Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom)*, Beijing, 2015, pp. 1591-1596.
doi: 10.1109/UIC-ATC-ScalCom-CBDCCom-IoP.2015.289
- [4] Tong Zhang, Guo-hui Yang, Wan-lu Li and Qun Wu, "A novel double-layer semi-circle fractal multi-band frequency selective surface," *Proceedings of the 9th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory*, Guangzhou, 2010, pp. 1124-1127.
doi: 10.1109/ISAPE.2010.5696675
- [5] Anuradha, A. Patnaik, S. N. Sinha and J. R. Mosig, "Design of customized fractal FSS," *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, 2012, pp. 1-2.
doi: 10.1109/APS.2012.6348599
- [6] M. Yan *et al.*, "A Quad-Band Frequency Selective Surface With Highly Selective Characteristics," in *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 26, no. 8, pp. 562-564, Aug. 2016.
doi: 10.1109/LMWC.2016.2585560
- [7] Tong Zhang, Guo-hui Yang, Wan-lu Li and QunWu, "A novel cubic isotropic band-reject frequency selective surface," *2010 IEEE 12th International Conference on Communication Technology*, Nanjing, 2010, pp. 543-546.
doi: 10.1109/ICCT.2010.5688904
- [8] D. S. Lockyer, J. C. Vardaxoglou and R. A. Simpkin, "Complementary frequency selective surfaces," in *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 147, no. 6, pp. 501-507, Dec 2000.
doi: 10.1049/ip-map:20000799
- [9] D. Rittenhouse, “An optical problem proposed by F. Hopkinson and solved”, *J. Am. Phil. Soc.* 201, 202-206, 1786.
- [10] T. Ma, H. Zhou, Y. Yang, B. Liu, “A FSS With Stable Performance Under Large Incident Angles,” *Progress In Electromagnetics Research Letters*, Vol. 41, 2013, pp. 159-166.
- [11] MARCUVITZ, N. “Waveguide Handbook”, Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1986, pp.280-289.

- [12] Site: Bjdihao/Gems. Disponível em: <<http://gems.bjdihao.com.cn/en/showroom/radome-fss/>> . Acesso em 3 de maio de 2017.
- [13] C. C. Njoku, J. C. Vardaxoglou and W. G. Whittow, "Complementary frequency selective surfaces in a waveguide simulator," *2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, Gothenburg, 2013, pp. 2420-2422.
- [14] C. C. Njoku, "A study on the properties of complementary frequency selective surfaces for permittivity measurements," *2015 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC)*, Loughborough, 2015, pp. 1-4.
doi: 10.1109/LAPC.2015.7365990.
- [15] C. C. Njoku, S. Zhang, W. G. Whittow and J. C. Vardaxoglou, "Open-Waveguide dielectric measurements using complementary frequency selective surfaces (CFSS)," *2015 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, Vancouver, BC, 2015, pp. 96-96.
doi: 10.1109/USNC-URSI.2015.7303380
- [16] D. Wang, Y. Chang, W. Che and Y. L. Chow, "A novel low-profile tri-band frequency selective surface," *2013 IEEE International Wireless Symposium (IWS)*, Beijing, 2013, pp. 1-4.
doi: 10.1109/IEEE-IWS.2013.6616698
- [17] S. S. Bukhari, W. G. Whittow, J. C. Vardaxoglou and S. Maci, "Square loop complementary frequency selective surfaces," *2015 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, Vancouver, BC, 2015, pp. 1258-1259.
doi: 10.1109/APS.2015.7305018
- [18] L. Zheng, S. Qu, J. Zhang, "Investigating the Dual-passbands Frequency Selective Surface with Complementary Structure," *PIERS Proceedings*, Guangzhou, China, August 25-28, 2014, pp. 1494-1498.
- [19] A. Ray, M. Kahar, S. Biswas, D. Sarkar, P. Sarkar, "A Dual Tuned Complementary Structure Frequency Selective Surface for WLAN Applications," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, Vol. 11, No. 1, June 2012, pp. 144-153.
- [20] S. Mondal, S. Nandi, T. Mandal, P. Sarkar, "Design Complementary Structures Frequency Selective Surface for WLAN & WIMAX Applications," *International Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 4, Jan - March 2013, ISSN: 2229-4333.
- [21] J. Jiao, J. Gao, N. Xu, X. Feng, Y. Wang, "The Tunable Property of Complementary Frequency Selective Surface with Rotationally Symmetric Element," *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*. Harbin, China, 2014. doi:10.1117/12.2067767.
- [22] T. K. Wu, "Improved bandpass FSS for wireless communications," *2014 USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium)*, Memphis, TN, 2014, pp. 153-153.
doi: 10.1109/USNC-URSI.2014.6955535
- [23] S. I. Sohail, K. P. Esselle and G. Kiani, "Design of a bandpass FSS on dual layer energy saving glass for improved RF communication in modern buildings," *Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation*, Chicago, IL, 2012, pp. 1-2.
doi: 10.1109/APS.2012.6348600

- [24] Y. Manna and R. W. Aldhaheeri, "New dual-band frequency selective surface for GSM shielding in secure-electromagnetic buildings using square loop fractal configurations," *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, Abu Dhabi, 2016, pp. 1-4.
doi: 10.1109/MMS.2016.7803813
- [25] BALANIS, C.A.: 'Antenna theory: analysis and design' (John Wiley, New York, 1997, 2nd edn.).
- [26] I. S. Syed, Y. Ranga, L. Matekovits, K. P. Esselle and S. Hay, "A Single-Layer Frequency-Selective Surface for Ultrawideband Electromagnetic Shielding," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 56, no. 6, pp. 1404-1411, Dec. 2014.
doi: 10.1109/TEM.2014.2316288
- [27] E. Unal, A. Gokcen and Y. Kutlu, "Effective electromagnetic shielding," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 48-54, Aug. 2006.
doi: 10.1109/MMW.2006.1663989.
- [28] HEMMING, L. H., *Architectural Electromagnetic Shielding Handbook: A Design and Specification Guide*. 1992, IEEE Press.
- [29] Site Roll-to-Roll, Flexible, and Multi-Functional. www.simtech.a-star.edu.sg
- [30] E. Unal, A. Gokcen and Y. Kutlu, "Effective electromagnetic shielding," in *IEEE Microwave Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 48-54, Aug. 2006.
doi: 10.1109/MMW.2006.1663989
- [31] CELOZZI S., ARANEO R., and LOVAT G., *Electromagnetic Shielding*. Wiley-Interscience, 2008. Hoboken.
- [32] V. V. S. Prakash and R. Mittra, "Technique for analysing cascaded frequency selective surface screens with dissimilar lattice geometries," in *IEE Proceedings - Microwaves, Antennas and Propagation*, vol. 150, no. 1, pp. 23-27, Feb. 2003.
doi: 10.1049/ip-map:20030436
- [33] R. H. C. Maniçoba, A. G. d'Assunção and A. L. P. S. Campos, "Wide stop-band cascaded frequency selective surfaces with Koch fractal elements," *Digests of the 2010 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Chicago, IL, 2010, pp. 1-1.
doi: 10.1109/CEFC.2010.5481337
- [34] S. Narayan, K. Prasad, R. U. Nair and R. M. Jha, "A novel EM analysis of cascaded thick FSS using mode-matching generalized scattering matrix technique," *2011 IEEE Applied Electromagnetics Conference (AEMC)*, Kolkata, 2011, pp. 1-4.
doi: 10.1109/AEMC.2011.6256848